

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

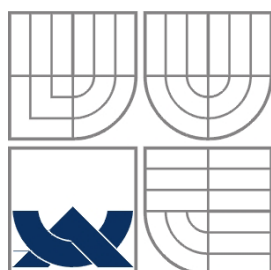
VÝPOČET A MĚŘENÍ PARAMETRŮ ASYNCHRONNÍCH MOTORŮ

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

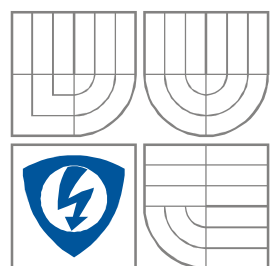
Bc. MARTIN NEKOVÁŘ

BRNO 2012



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY
A ELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC
ENGINEERING

VÝPOČET A MĚŘENÍ PARAMETRŮ ASYNCHRONNÍCH MOTORŮ

CALCULATION AND MEASUREMENT OF INDUCTION MOTOR PARAMETERS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

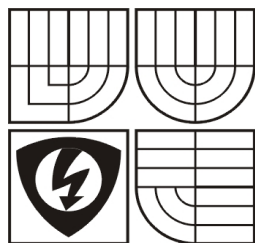
Bc. MARTIN NEKOVÁŘ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. ONDŘEJ VÍTEK, Ph.D.

BRNO 2012



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika

Student: Bc. Nekovář Martin

Ročník: 2

ID: 106667

Akademický rok: 2011/2012

NÁZEV TÉMATU:

Výpočet a měření parametrů asynchronních motorů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Seznamte se s problematikou výpočtu parametrů asynchronního motoru a s metodou konečných prvků.
2. Pomocí analytického výpočtu zjistěte parametry náhradního schématu zadaných strojů z dodané výrobní dokumentace.
3. Vytvořte modely těchto strojů a vypočtěte parametry náhradního schématu s využitím metody konečných prvků.
4. Proved'te měření a výsledky dosažené jednotlivými postupy srovnějte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Dle pokynů vedoucího

Termín zadání: 21.9.2011

Termín odevzdání: 21.5.2012

Vedoucí práce: Ing. Ondřej Vítek, Ph.D.

Konzultanti diplomové práce:

Ing. Ondřej Vítek, Ph.D.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Abstrakt

Tématem této diplomové práce je výpočet a měření parametrů asynchronního motoru. Práce je rozdělena do několika částí. V první a druhé části je obecně popsána konstrukce a princip funkce asynchronních motorů. Konstrukce zahrnuje popis jednotlivých částí asynchronního motoru, které tvoří stator a rotor. Práce se věnuje třífázovým souměrným a částečně nesouměrným jednofázovým motorům. Princip funkce s využitím točivého magnetického pole, které je u třífázových motorů kruhové, jednofázové motory mají pole eliptického tvaru. Dále je probráno náhradní schéma asynchronního motoru. Analytické početní zjištění velikostí parametrů motoru pomocí příslušných vzorců je obsahem části čtvrté. V této části práce jsou definovány postupy k získání parametrů náhradního schématu asynchronního motoru. V následující kapitole je pomocí dodané dokumentace proveden postup výpočtu parametrů náhradního schématu třífázového asynchronního motoru pro konkrétní typ. Další obsah práce pojednává o metodě konečných prvků, simulaci a měření asynchronních motorů k získání parametrů ze zkoušky naprázdno a nakrátko. Srovnání výsledků z měření, analytického výpočtu a ze simulace je uvedeno v poslední kapitole.

Abstract

The theme of this master's thesis is calculation and measurement of the parameters of induction motor. The thesis is divided into several parts. The first and the second part describes the general construction and operating principle of asynchronous motors. The construction includes a description of each part of induction motor, which consists of stator and rotor. The thesis deals with three-phase symmetrical and asymmetric single-phase motors. Principle of operation with using the rotating magnetic field, which is circular at three-phase motors, single phase motors have field elliptical shape. The next part contains the motor replacement scheme. The fourth part contains the calculation of motor's parameters through the formulas. In this part the procedures for obtaining parameters of the replacement scheme of induction motor are defined. The process of calculating the parameters of the motor replacement scheme of three-phase asynchronous motor is created according to given documentation is the next part for the certain type. The next content of the thesis describe finite element method, simulation and measurement of asynchronous motors to get of parameters from no-load and short-circuit test. The comparison of the results from measurement, analytical calculation and from simulation is given in the last chapter.

Klíčová slova

Asynchronní motor; konstrukce; princip funkce; výpočet parametrů; měření parametrů; metoda konečných prvků MKP; simulace

Keywords

Asynchronous motor; construction; principle of operation; calculation of parameters; measurement of parameters; finite element method FEM; simulation

Bibliografická citace

NEKOVÁŘ, M. *Výpočet a měření parametrů asynchronních motorů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 65 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Ondřej Vítek, Ph.D..

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Výpočet a měření parametrů asynchronních motorů jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne Podpis autora

Poděkování

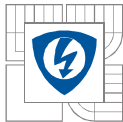
Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Ondřeji Vítkovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne Podpis autora



Obsah

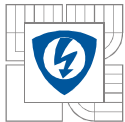
SEZNAM OBRÁZKŮ.....	9
SEZNAM TABULEK	10
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	11
ÚVOD	13
1 KONSTRUKCE ASYNCHRONNÍCH MOTORŮ	14
1.1 OBECNÁ KONSTRUKCE ASYNCHRONNÍCH MOTORŮ (3F MOTOR)	14
1.2 KONSTRUKCE JEDNOFÁZOVÝCH ASYNCHRONNÍCH MOTORŮ	14
1.2.1 CHARAKTER POMOCNÉ (ROZBĚHOVÉ) IMPEDANCE	15
1.2.2 SPOUŠTĚNÍ JEDNOFÁZOVÉHO MOTORU.....	15
1.3 STATOROVÉ VINUTÍ ASYNCHRONNÍHO MOTORU	15
1.4 ROTOROVÉ VINUTÍ ASYNCHRONNÍHO MOTORU	15
1.5 DRUHY KLECOVÝCH VINUTÍ.....	16
1.5.1 VÍROVÉ KLECE	16
1.5.2 DVOJITÉ KLECE	16
2 PRINCIP FUNKCE ASYNCHRONNÍHO MOTORU.....	16
2.1 TŘÍFÁZOVÝ ASYNCHRONNÍ MOTOR.....	16
2.2 JEDNOFÁZOVÝ MOTOR BEZ POMOCNÉ IMPEDANCE	17
2.3 JEDNOFÁZOVÝ MOTOR S POMOCNOU FÁZÍ	17
3 OBVODOVÝ MODEL ASYNCHRONNÍHO MOTORU.....	18
3.1 OBVODOVÝ MODEL JEDNÉ FÁZE 3F ASYNCHRONNÍHO MOTORU[4]	18
3.1.1 MOMENT A MOMENTOVÁ CHARAKTERISTIKA ASYNCHRONNÍHO MOTORU	20
4 ANALYTICKÝ VÝPOČET PARAMETRŮ 3F MOTORU	21
4.1 MAGNETIZAČNÍ PROUD I_M [A].....	21
4.2 ODPORY A REAKTANCE ASYNCHRONNÍHO STROJE	26
4.2.1 ODPOR VINUTÍ STATORU R_1 [Ω]	26
4.2.2 ODPOR VINUTÍ ROTORU R_2 [Ω]	26
4.2.3 ROZPTYLOVÁ REAKTANCE FÁZE STATOROVÉHO VINUTÍ $X_{1\Sigma}$ [Ω]	28
4.2.4 ROZPTYLOVÁ REAKTANCE FÁZE ROTOROVÉHO VINUTÍ $X_{2\Sigma}$ [Ω]	29
4.2.5 VLIV NATOČENÍ DRÁŽEK.....	30
4.3 CELKOVÉ ZTRÁTY V ŽELEZE ASYNCHRONNÍCH MOTORŮ ΔP_{Fe} [Ω]	30
4.4 MECHANICKÉ A VENTILAČNÍ ZTRÁTY ΔP_{MECH} [W]	33
4.5 ELEKTRICKÉ ZTRÁTY VE STATOROVÉM VINUTÍ PŘI CHODU NAPRÁZDNO (JOULEOVY ZTRÁTY) ΔP_{j0} [W]	33
4.6 PROUD NAPRÁZDNO MOTORU I_0 [A]	34
5 VÝPOČET PARAMETRŮ PRO MOTOR TM90-4S[7].....	34



6 METODA KONEČNÝCH PRVKŮ (MKP)	42
6.1 OBECNĚ K METODĚ KONEČNÝCH PRVKŮ	42
6.2 SIMULACE MOTORŮ V PROGRAMU FEMM.....	42
6.3 VYTVOŘENÍ MODELŮ MOTORŮ	43
6.4 MODELOVÁNÍ ASYNCHRONNÍHO MOTORU TM90-4S A TM71-2S[7]	43
6.4.1 NÁHRADNÍ SCHÉMA JEDNÉ FÁZE INDUKČNÍHO MOTORU V USTÁLENÉM STAVU	43
6.4.2 ODVOZENÍ MOMENTU M [N·m] Z NÁHRADNÍHO SCHÉMATU[10]:	43
6.5 VÝSLEDKY SIMULACÍ - VÝPOČET MOMENTU M.....	45
7 MĚŘENÍ 3F ASYNCHRONNÍCH MOTORŮ.....	47
7.1 ZKOUŠKA NAPRÁZDNO - TM90-4S	47
7.2 ZKOUŠKA NAPRÁZDNO - TM71-2S	48
7.3 ZKOUŠKA NAKRÁTKO - TM90-4S	48
7.4 ZKOUŠKA NAKRÁTKO - TM71-2S	48
8 SROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ	49
9 ZÁVĚR.....	51
LITERATURA	52
PŘÍLOHY	53

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. č.1: Zapojení svorkovnice 3f asynchronního motoru.....</i>	<i>14</i>
<i>Obr. č.2: Rozklad stojatého pole na dvě točivá (převzato z [1]).....</i>	<i>17</i>
<i>Obr. č.3: Obvodový model skutečného transformátoru při zatížení (převzato z [4])</i>	<i>18</i>
<i>Obr. č.4: Obvodový model asynchronního motoru (převzato z [4])</i>	<i>19</i>
<i>Obr. č.5: Obvodový model asynchronního motoru s přemístěnou magnetizační větví na vstupní svorky (převzato z [4])</i>	<i>19</i>
<i>Obr. č.6: Momentová charakteristika asynchronního stroje (převzato z [4])</i>	<i>20</i>
<i>Obr. č.7: Rozměry kruhu rotoru – podélný řez rotorem (převzato z [1])</i>	<i>26</i>
<i>Obr. č. 8: Ukázka sítě uzlů a elementů (mesh) v programu FEMM[11]</i>	<i>42</i>
<i>Obr. č.9: Náhradní schéma jedné fáze indukčního motoru v ustáleném stavu (převzato z [10])..</i>	<i>43</i>
<i>Obr. č.10:Srovnání momentových charakteristik - TM90-4S.....</i>	<i>50</i>
<i>Obr. č.11:Srovnání momentových charakteristik - TM71-2S.....</i>	<i>50</i>
<i>Obr. č.12: Měření naprázdno - TM90-4S - graf a)</i>	<i>62</i>
<i>Obr. č.13:Měření naprázdno - TM90-4S - graf b)</i>	<i>63</i>
<i>Obr. č.14:Měření naprázdno - TM90-4S - graf c)</i>	<i>63</i>
<i>Obr. č.15:Měření naprázdno - TM71-2S - graf d)</i>	<i>64</i>
<i>Obr. č.16:Měření naprázdno - TM71-2S - graf e)</i>	<i>64</i>
<i>Obr. č.17:Měření naprázdno - TM71-2S - graf f)</i>	<i>65</i>



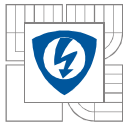
SEZNAM TABULEK

<i>Tab. č.1: Zvláštnosti klecového rotorového vinutí[3]</i>	<i>28</i>
<i>Tab. č.2: Výsledné vypočítané hodnoty z Lua skriptů - TM90-4S.....</i>	<i>45</i>
<i>Tab. č.3: Výsledné vypočítané hodnoty z Lua skriptů - TM71-2S.....</i>	<i>45</i>
<i>Tab. č.4: Naměřené hodnoty při zkoušce naprázdno motoru TM90-4S - 1.část.....</i>	<i>47</i>
<i>Tab. č.5: Naměřené a vypočtené hodnoty při zkoušce naprázdno motoru TM90-4S - 2.část.....</i>	<i>47</i>
<i>Tab. č.6: Naměřené a vypočtené hodnoty při zkoušce naprázdno motoru TM71-2S.....</i>	<i>48</i>
<i>Tab. č.7: Naměřené hodnoty při zkoušce nakrátko motoru TM90-4S - 1.část.....</i>	<i>48</i>
<i>Tab. č.8: Naměřené a vypočtené hodnoty při zkoušce nakrátko motoru TM90-4S - 2.část.....</i>	<i>48</i>
<i>Tab. č.9: Vypočtené hodnoty při zkoušce nakrátko motoru TM90-4S - 3.část.....</i>	<i>48</i>
<i>Tab. č.10: Naměřené hodnoty při zkoušce nakrátko motoru TM71-2S - 1.část.....</i>	<i>48</i>
<i>Tab. č.11: Vypočtené hodnoty při zkoušce nakrátko motoru TM71-2S - 2.část.....</i>	<i>49</i>
<i>Tab. č.12: Srovnání výsledků - asynchronní motor TM90-4S.....</i>	<i>49</i>
<i>Tab. č.13: Srovnání výsledků - asynchronní motor TM71-2S.....</i>	<i>49</i>



SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

$2p$	počet pólů stroje
a_{kn}, b_{kn}	rozměry rotorového kruhu
B	magnetická indukce
b_{01}, b_{02}	otevření statorové a rotorové drážky
b_{zr}	šířka zubu rotoru
b_{zs}	šířka zubu statoru
D	průměr
D	vnitřní průměr statoru (vrtání statoru)
D_h	průměr hřídele
D_{kn}	střední průměr rotorového kruhu
f_1	kmitočet napájecí sítě
F_m	magnetomotorická síla pólové dvojice
H	intenzita magnetického pole
h_{j1}	výška jha na rotoru
h_{j2}	výška jha na statoru
h_{d2}	výška rotorové drážky
h_{d1}	výška statorové drážky
I	elektrický proud
k_c	Carterův činitel
k_{c1}, k_{c2}	Carterův činitel pro stator a rotor
k_{v1}	činitel vinutí
k_{y1}	činitel kroku
l	délka indukční čáry
l_{ξ}	přibližná délka čela
L_e	efektivní délka železa
m	hmotnost
n	otáčky
N_1	počet závitů v sérii
p	počet pólů
$\Delta p_{1,0}$	ztrátové číslo pro magnetickou indukci 1T
q	počet drážek na pól a fázi
Q_1	počet drážek na statoru



Q_2	počet drážek na rotoru
R	elektrický odpor
R'_2	přepočtený odpor rotorového vinutí
R_t	odpor rotorové tyče
S_{kn}	průřez kruhu rotoru
S_t	průřez rotorové tyče
t_{d2}	drážková rozteč rotoru
t_{d1}	drážková rozteč statoru
U	magnetické napětí
U_1	svorkové napětí
X	reaktance
Z	impedance
γ	hustota statorového plechu
δ	délka vzduchové mezery
ΔP_{Cu1}	ztráty v mědi statoru
ΔP_{Fe}	ztráty v železe
ΔP_m	mechanické ztráty
λ	jednotková vodivost
μ_0	permeabilita vakua ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H}\cdot\text{m}^{-1}$)
ρ	rezistivita
t_p	pólová rozteč
Φ	magnetický tok

ÚVOD

Asynchronní stroje patří mezi nejrozšířenější střídavé elektrické stroje. Tyto stroje mohou pracovat jako motory a přeměňovat tak elektrickou energii na mechanickou nebo jako generátory, které elektrickou energii vyrábějí přeměnou z mechanické energie. Jejich největší uplatnění je ve funkci motorů. Vyrábí se v širokém rozsahu výkonů od desítek W do tisíců kW. Používaná velikost napájecí frekvence střídavého proudu u těchto strojů je 50 Hz v ČR[3].

Asynchronní motory jsou jedny z nejvíce používaných elektrických pohonů a to zejména pro svou konstrukční jednoduchost, spolehlivost a nenáročnost na údržbu. Z tohoto důvodu je možné se s nimi setkat zejména v průmyslu, ale také v domácnostech, kde slouží pro pohon chladniček, čerpadel, ventilátorů a dalších zařízení.

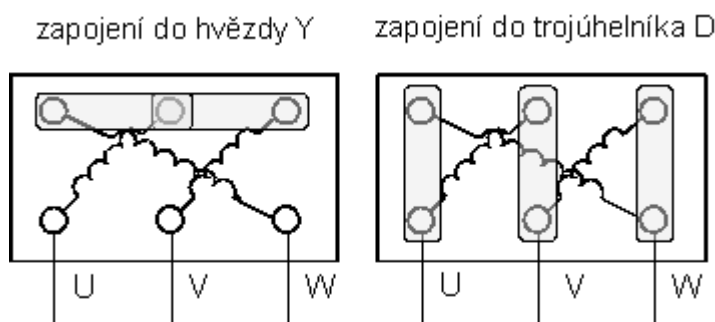
Třífázové asynchronní motory vyžadují pro svůj provoz připojení k třífázovému rozvodu elektrické energie. Mohou být zapojeny do hvězdy (Y) nebo do trojúhelníka (D). Přímé připojení k elektrické síti je možné pouze za přesně definovaných podmínek omezujících připojení motorů o dosti velkém výkonu, což by mělo za následek velký pokles napětí v místě připojení a zapůsobení elektrických ochran. Tyto motory lze proto spouštět několika způsoby, mezi které patří rozběh hvězda – trojúhelník, autotransformátor zapojený v obvodu statoru, statorový spouštěč a další. Třífázové motory se nehodí pro použití v místech, kde není k dispozici třífázová napájecí síť, ale pouze jednofázové rozvody. Asynchronní motor, který obsahuje tři fáze, může být použit i v jednofázové síti avšak za cenu snížení jeho výkonu, což může být v některých aplikacích použití tohoto stroje nežádoucí. Kompromisem mezi výhodami třífázových asynchronních strojů a použitím na jednofázové síti vznikl jednofázový asynchronní motor s pomocným (rozběhovým) vinutím. Tento motor obsahuje přídatnou impedanci, která je nejčastěji kapacitního charakteru. Tvoří ji kondenzátor s pevným dielektrikem zapojený do série s pomocnou fází. Vznikne tak pomocné vinutí obsahující přidanou impedanci, které je paralelně připojeno k vinutí hlavnímu. Rozběhová impedance kapacitního charakteru způsobí, že motor se rozběhne bez použití mechanického podnětu. Bez pomocné impedance by se totiž nerozběhl, jelikož napájení jednofázovým proudem způsobí vznik pouze stojatého magnetického pole. Jednofázový asynchronní motor patří mezi nesoúměrné stroje, u kterého není jednoduché vypočítat jeho návrhové parametry[6].

Mezi nevýhody asynchronních strojů patří jejich větší hmotnost na jednotku výkonu oproti stroji stejnosměrnému stejného výkonu. Naproti tomu velkou výhodou asynchronních motorů je to, že nemají komutátor, který bývá zdrojem poruch a vyžaduje údržbu. S rychle se rozšiřujícím rozvojem výkonové elektroniky je možné snáze řídit otáčky asynchronní motoru změnou frekvence při současné změně napájecího napětí pomocí frekvenčních měničů, což dříve nebylo u tohoto druhu motoru možné.

1 KONSTRUKCE ASYNCHRONNÍCH MOTORŮ

1.1 Obecná konstrukce asynchronních motorů (3f motor)

Asynchronní motory se skládají ze dvou základních částí. První částí je stator obsahující vinutí z mědi, které může být třífázové nebo jednofázové (hlavní a pomocné vinutí). Vinutí se ukládají do statorového paketu elektrotechnických plechů, který je nalisován do kostry motoru. Vodiče v drážkách jsou lakované nebo smaltované a musí být izolovány od statorových plechů. Plechy jsou mezi sebou také izolovány. Kostra je vyrobena z hliníku nebo litiny a má žebrování na svém povrchu sloužící k ochlazování stroje během provozu. Na přední a zadní straně motoru se nachází ložiskové štíty, ve kterých jsou uložena ložiska. Spodní část kostry obsahuje patky k přichycení stroje. S ohledem na použití motoru může obsahovat přírubu. Statorový svazek se impregnuje zejména k dosažení určité mechanické pevnosti. Ve svazku mohou být zapletena čidla k měření teploty vinutí. Svorkovnice třífázového asynchronního motoru má šest svorek, mezi které jsou zapojena tři vinutí. K možnosti zapojení motoru do hvězdy nebo do trojúhelníka slouží tři malé kovové spojky.



Obr. č.1: Zapojení svorkovnice 3f asynchronního motoru

Další základní částí motoru je rotor. Na rotoru se nachází klecové vinutí v případě asynchronního motoru s klecí nakrátko nebo třífázové vinutí, jehož konce jsou vyvedeny ke kroužkům na rotoru. Proud protéká přes sběrací kartáče do odporových spouštěčů. U klecového vinutí je na rotoru klec vyrobená z hliníku nebo mědi. Tato klec je zastříknuta do paketu rotorových plechů. Ty jsou pak s klecí nalisovány na hřídel. Hřídel obsahuje vyfrézovanou drážku, do které se umísťuje pero. Na kleci bývají malé lopatky sloužící k ventilaci motoru. K aktivnímu chlazení motoru je na hřídel nasazen plastový ventilátor. Ke snížení vibrací stroje během jeho provozu se používají podložky, které jsou nasazeny na malé válečky po obvodu kruhu rotorové klece a následně mechanicky zafixovány (rozklepáním válečků).

1.2 Konstrukce jednofázových asynchronních motorů

Jednofázové asynchronní motory se skládají z pevné nerotující části, kterou je stator a z pohyblivé části rotoru stejně jako motory třífázové. Obvykle se vyrábí menšího výkonu a to přibližně do 1 kW. Stator je tvořen kostrou, která je odlita z litiny, případně z hliníku. Dále stator obsahuje přední a zadní ložiskový štít, ve kterých jsou uložena ložiska, svorkovnici sloužící

k připojení přívodních vodičů, paket statorových plechů, ve kterých je uloženo hlavní a pomocné rozběhové vinutí, patky, ventilátor a v některých případech může obsahovat i přírubu.

Rotor je složen z elektrotechnických plechů tvořících paket, do kterého je zastříknuta hliníková (měděná) klec a hřídele s vyfrézovanou drážkou pro pero. K hlavnímu vinutí je paralelně připojeno pomocné vinutí se sériově připojenou impedancí.

V paketu statorových plechů jsou vytvořeny drážky, od kterých jsou izolována obě vinutí. Vinutí jsou tvořena lakovaným nebo smaltovaným měděným vodičem. Podle způsobu spojení závitů na statoru mluvíme o vinutí soustředném nebo se stejnými cívkami. U soustředného vinutí nedochází ke křížení vodičů na čelech vinutí jako je tomu u vinutí se stejnými cívkami. K ochlazování motoru při chodu slouží plastový ventilátor umístěný v drážce na hřídeli a žebrování na kostře statoru, pomocí kterého dochází k výměně tepla mezi povrchem motoru a okolním vzduchem[1].

1.2.1 Charakter pomocné (rozběhové) impedance

Impedance sériově připojená k pomocnému vinutí je nejčastěji kapacitního charakteru tvořená kondenzátorem vhodné kapacity, kterou lze vypočítat pomocí empirického vzorce. Pro rozběh motoru lze také použít impedanci indukčního nebo odporového charakteru. Obě vinutí budou napájena střídavým proudem, které jsou vzájemně fázově posunuty. Pomocné vinutí lze po rozběhu odpojit pomocí odstředivého vypínače nebo proudového relé. V mnoha případech se však přídatná impedance nechává připojena i za provozu ke zlepšení některých vlastností stroje. Jinou možností je použít dva elektrolytické kondenzátory o odlišné kapacitě a odpojit za provozu pouze jeden z nich[6].

1.2.2 Spouštění jednofázového motoru

Řízení zapnutí motoru lze buď mechanicky pomocí ručně ovládaného spínače, případně automaticky ovládaného stykače. Jinou možností je použití triaku, pomocí kterého lze zapnout a vypnout jednofázový motor, např. čerpadlo nebo jej spouštět s využitím funkce soft-start. Funkci soft-start lze s výhodou využít tam, kde je potřeba spouštět několik jednofázových motorů zapojených na síť k omezení vypadávání elektrických ochranných.

1.3 Statorové vinutí asynchronního motoru

Vinutí statoru může být tvořeno soustřednými nebo stejnými cívkami. U soustředných cívek nedochází ke křížení vodičů na čelech vinutí jako je tomu u vinutí se stejnými cívkami. U trojfázových motorů jsou drážky vyplněny cívkami pro každou fázi. U jednofázového asynchronního motoru jsou statorové drážky z 2/3 vyplněny vodiči hlavního vinutí, zbylá 1/3 je vyplněna vodiči rozběhového vinutí[1].

1.4 Rotorové vinutí asynchronního motoru

Zvětšením odporu rotorového vinutí po dobu rozběhu dochází ke zlepšení rozběhových charakteristik. Při zapojení spouštěcího odporníku do obvodu rotoru lze dosáhnout zvětšení jeho odporu. Pomocí tohoto způsobu lze docílit potřebného průběhu rozběhového proudu a momentu, avšak má své nevýhody a to ve složitější konstrukci stroje a s tím souvisejícími problémy.

Řešením, které by odstranilo tyto nevýhody, je použití asynchronního motoru nakrátko, který obsahuje klecové vinutí[3].

1.5 Druhy klecových vinutí

1.5.1 Vírové klece

Vírová klec se nazývá vinutí s relativně úzkými a vysokými vodiči obdélníkového či lichoběžníkovitého průřezu. Důvod použití této konstrukce spočívá v tom, že v první fázi rozběhu, při které se rotorová frekvence f_2 přibližně rovná frekvenci statoru f_1 , dochází ke vzniku značných vířivých proudů v tyčích rotoru. Tyto proudy jsou vyvolané rozptylovým polem, které prochází drážkami rotoru. Vířivé proudy se skládají s rotorovým proudem. To má za následek rozdělení proudové hustoty v rotorové tyči. V části tyče, která je blíže ke vzduchové mezeře, se soustřeďuje proud. Velikost elektrických ztrát podstatně naroste. Tomu odpovídá zařazení dodatečných odporů do obvodu rotoru. Na velikost reaktance má vliv změna rozdělení proudové hustoty. Frekvence v rotoru se při rozběhu postupně zmenšuje, dochází také ke zmenšení vířivých proudů a nerovnoměrného rozložení proudu v rotorové tyči. Kmitočet má malou hodnotu a proudová hustota je rozložena prakticky rovnoměrně při jmenovitém zatížení[3].

1.5.2 Dvojité klece

Klecové vinutí s dvěma soustavami rotorových tyčí se nazývá dvojitá klec. Vnější klec je tvořena tyčemi kruhového průřezu z normální nebo legované mosazi. Tento materiál má zvětšený měrný odpor. Vnitřní klec je vyrobena z měděných kruhových nebo obdélníkových tyčí. Z mědi jsou také vyrobeny kruhy nakrátko. Při první fázi rozběhu, kdy frekvence f_1 přibližně odpovídá f_2 je reaktance vnitřní klece výrazně větší než vnější klece. Z tohoto důvodu protéká rotorový proud převážně vnější klecí s velkým odporem, což způsobuje snížení záběrného proudu a zvýšení záběrného momentu. Rotorová frekvence se při rozběhu zmenšuje a proud rotoru přebírá ve větší míře klec vnitřní. Reaktance klecí je relativně velice malá při malých skluzech. Proudů v klecích se rozděluje nepřímo úměrně jejich odporům. Vnitřní klecí protéká převážná část proudu, protože její tyče jsou většího průřezu a jsou vyrobeny z materiálu o menším měrném odporu[3].

2 PRINCIP FUNKCE ASYNCHRONNÍHO MOTORU

2.1 Třífázový asynchronní motor

Statorové vinutí motoru je napájeno ze zdroje třífázového proudu. Po připojení napájení začne třífázovým vinutím protékat střídavý proud. Tento proud způsobí vznik točivého magnetického pole, které indukuje napětí do rotorového vinutí. Indukované napětí protlačí tímto vinutím proud. Dojde k vytvoření magnetického pole kolem rotoru. Vzájemnou interakcí obou magnetických polí dochází ke vzniku točivého momentu a třífázový motor se roztočí. Otáčky rotoru budou mít hodnotu vždy menší než synchronní otáčky sítě n_s .

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p} \quad [\text{min}^{-1}] \quad (2.0)$$

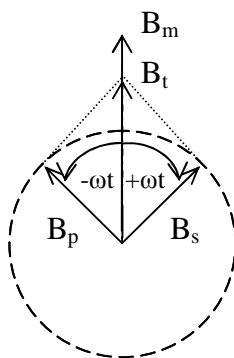
p ... počet pólpárů [-]

Rozdíl mezi otáčkami točivého magnetického pole statoru a skutečnými otáčkami rotoru se vyjadřuje pomocí tzv. skluzu s .

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad [-] \quad (2.1)$$

Velikost skluzu $s = 0$ znamená, že se z asynchronního motoru stává asynchronní generátor. Při hodnotě skluzu $s = 1$ se motor nachází ve stavu nakrátko, tzn., že rotor motoru se neotáčí.

2.2 Jednofázový motor bez pomocné impedance



Obr. č.2: Rozklad stojatého pole na dvě točivá (převzato z [1])

Napájení motoru jednofázovým proudem způsobí pouze pole pulzující. Jednofázový motor lze vysvětlit na principu dvou magnetických točivých polí pohybujících se synchronní rychlostí proti sobě. Jedno pole se nazývá sousledné, které běží ve směru otáčení rotoru a druhé je protiběžné a otáčí se naopak. Obě pole mají hodnotu amplitudy rovnou polovině amplitudy rozkládaného pole V klidovém stavu jsou velikosti obou polí stejné a motor se netočí. Při roztočení hřídele na jednu stranu dochází ke zvýšení vlivu pole v tomto směru a motor se začne točit. Vliv pole je větší s rostoucí rychlostí hřídele[1].

2.3 Jednofázový motor s pomocnou fází

Jednofázový motor bez pomocného vinutí se po připojení k elektrické síti nerozběhne, protože má nulový záběrný moment. K tomu, aby se rozběhl je potřeba mechanického impulsu vyvolaného vnější silou, např. trhnutím za řemen nebo klikou. Tento způsob se však nepoužívá, protože je nepraktický. Jestliže však připojíme k pomocnému vinutí rozběhovou impedanci, motor se sám roztočí z klidového stavu po připojení napájecího napětí. Ve velké většině případů se jako pomocná impedance používá elektrolytický kondenzátor na střídavé napětí, který se zapojí do série k vinutí rozběhovému, tím vznikne pomocná fáze. Reverzaci chodu motoru je možné dosáhnout přepólováním svorek hlavního nebo rozběhového vinutí[1].

3 OBVODOVÝ MODEL ASYNCHRONNÍHO MOTORU

3.1 Obvodový model jedné fáze 3f asynchronního motoru[4]

Za předpokladu harmonických průběhů napětí a proudů byl odvozen obvodový model asynchronního motoru na Obr.4 a platí pro jednu fázi statorového vinutí.

$$U_{i1} = 4,44 \cdot f_1 \cdot \Phi \cdot N_1 \cdot k_{v1} \quad (3.0)$$

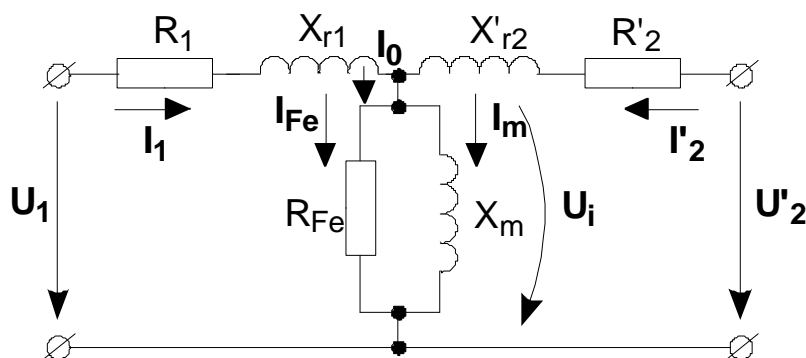
$$U_{i2} = 4,44 \cdot f_2 \cdot \Phi \cdot N_2 \cdot k_{v2} = 4,44 \cdot s \cdot f_1 \cdot \Phi \cdot N_2 \cdot k_{v2} = s \cdot U_{i20} \quad (3.1)$$

Odvozené vztahy (3.0) a (3.1) jsou prakticky shodné se vztahy pro indukované napětí ve vinutích transformátoru (3.2) a (3.3).

$$U_{i1} = 4,44 \cdot f_1 \cdot \Phi_m \cdot N_1 \quad (3.2)$$

$$U_{i2} = 4,44 \cdot f_2 \cdot \Phi_m \cdot N_2 \quad (3.3)$$

Společný magnetický obvod mají podobně jako u transformátoru obě vinutí (statorové a rotorové) a každé vinutí má činný odpor a vlastní a rozptylovou indukčnost. Veličiny rotoru přepočítáme na počet závitů vinutí statoru, abychom mohli použít stejný obvodový model jako na Obr.3.



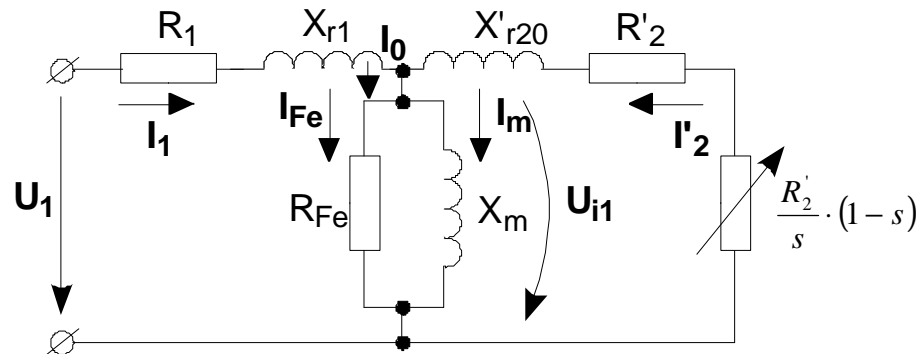
Obr. č.3: Obvodový model skutečného transformátoru při zatížení (převzato z [4])

Vztahy pro přepočet budou stejné jako u transformátoru (3.4), (3.5) a (3.6), pouze počet závitů obou vinutí se vynásobí příslušným činitelem vinutí k_v . Čárkou se značí přepočtené hodnoty Obr.4.

$$\dot{U}_2' = \frac{1}{k} \cdot \dot{U}_2 \quad (3.4)$$

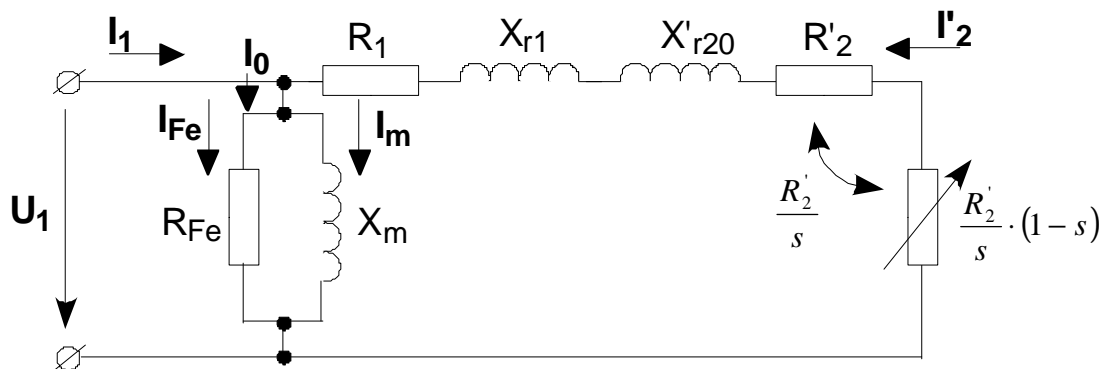
$$\dot{I}_2' = k \cdot \dot{I}_2 \quad (3.5)$$

$$\dot{Z}_2' = \frac{1}{k^2} \cdot \dot{Z}_2 \quad (3.6)$$



Obr. č.4: Obvodový model asynchronního motoru (převzato z [4])

Obvodový model zjednodušíme přemístěním magnetizační větve na vstupní svorky Obr.5 pro snadnější určení momentu.



Obr. č.5: Obvodový model asynchronního motoru s přemístěnou magnetizační větví na vstupní svorky (převzato z [4])

Na proměnném kmitočtu f_2 závisí indukované napětí a rozptylová reaktance rotoru. Pomocí konstantního kmitočtu f_1 napájecího napětí a skluzu lze vyjádřit kmitočet f_2 (3.7) pro účely obvodového modelu. Vztah (3.8) pro indukované napětí rotoru je při uvažování přepočtených hodnot ze vztahu (3.1).

$$f_2 = s \cdot f_1 \quad (3.7)$$

$$U'_{i1} = s \cdot U'_{i20} = s \cdot U_{i1} \quad (3.8)$$

$$X'_{r2} = \omega_2 \cdot L'_{r2} = 2\pi f_2 \cdot L'_{r2} = 2\pi \cdot s \cdot f_1 \cdot L'_{r2} = s \cdot X'_{r20} \quad (3.9)$$

X'_{r20} ... reaktance zabrzděného motoru ($n = 0 \text{ min}^{-1}$, $f_1 = f_2$)

$$\text{Přepočtený proud rotoru: } I'_2 = \frac{s \cdot U'_{i20}}{\sqrt{R_2'^2 + (s \cdot X'_{r20})^2}} = \frac{U'_{i1}}{\sqrt{\frac{R_2'^2}{s^2} + (X'_{r2})^2}} \quad (3.10)$$

$$\mathbf{Z}'_2 = R'_2 + jX'_{r20} \cdot s \quad (3.11)$$

$\frac{R_2'}{s}$... celkový činný odpor rotoru

Rozdělení celkového činného odporu na konstantní odpor vinutí a na proměnný odpor závislý na skluzu:

$$\frac{R_2'}{s} = R_2 + \frac{1-s}{s} \cdot R_2' \quad (3.12)$$

3.1.1 Moment a momentová charakteristika asynchronního motoru

Příkon motoru P_1 :

$$P_1 = m_1 \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi \quad [W] \quad (3.13)$$

m_1 ... počet fází statorového vinutí [-]

U_1 ... velikost napájecího napětí [V]

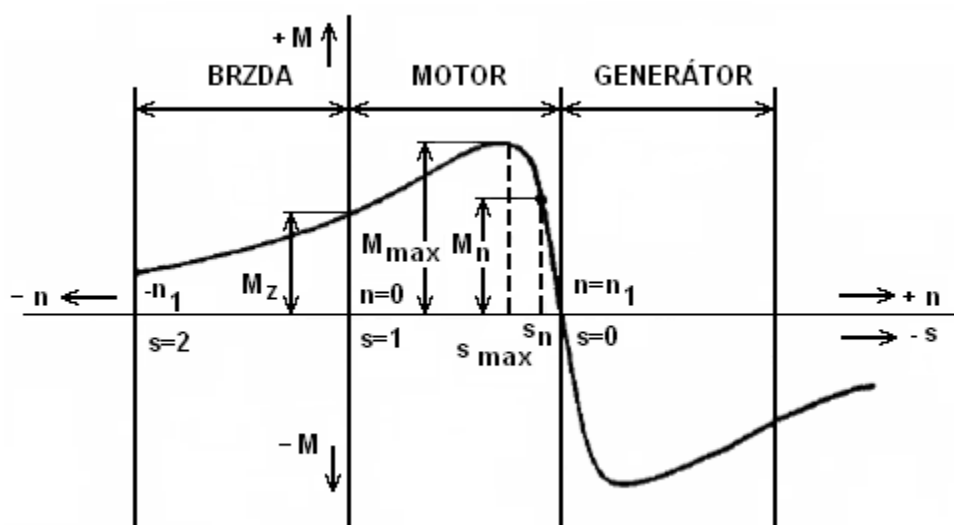
I_1 ... proud [A]

$\cos \varphi$... účinník [-]

Vzorec pro výpočet mechanického momentu M_{mech} :

$$M_{\text{mech}} = \frac{m_1 \cdot p \cdot U_1^2 \cdot \frac{R_2'}{s}}{2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot \left[\left(R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + (X_{r1} + X_{r20}')^2 \right]} \quad [N \cdot m] \quad (3.14)$$

p ... počet pólpárů [-]



Obr. č.6: Momentová charakteristika asynchronního stroje (převzato z [4])

4 ANALYTICKÝ VÝPOČET PARAMETRŮ 3F MOTORU

Postupná metoda pro výpočet parametrů asynchronního motoru byla čerpána z literatury [8]. Pomocí analytického výpočtu byly vypočítávány parametry náhradního schématu 3f asynchronních motorů TM90-4S a TM71-2S z dodaných výrobních dokumentací[7].

4.1 Magnetizační proud I_μ [A]

Pólová rozteč t_p :

$$t_p = \frac{\pi D}{2p_1} [m] \quad (4.0)$$

D ... vnitřní průměr statoru (vrtání statoru) [m]

$2p_1$... počet pólů stroje [-]

Činitel zkrácení kroku statorového vinutí k_{y1} :

$$k_{y1} = \sin\left(\frac{y}{t_p} \cdot \frac{\pi}{2}\right) [-] \quad (4.1)$$

y ... skutečný krok statorového vinutí [m]

$\frac{y}{t_p}$... zkrácení kroku statorového vinutí [-]

Počet drážek na pól a fázi statorového vinutí q_1 :

$$q_1 = \frac{Q_1}{2p_1m_1} [-] \quad (4.2)$$

Q_1 ... počet drážek na statoru [-]

m_1 ... počet fází statorového vinutí [-]

Činitel rozlohy statorového vinutí k_{r1} :

$$k_{r1} = \frac{0,5}{q_1 \cdot \sin \frac{30^\circ}{q_1}} [-] \quad (4.3)$$

Činitel statorového vinutí k_{v1} :

$$k_{v1} = k_{y1}k_{r1} [-] \quad (4.4)$$

Činitel tvaru pole k_B :

$$k_B = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} [-] \quad (4.5)$$

Magnetický tok Φ :

$$\Phi = \frac{k_E U_{1N}}{4k_B N_1 k_{v1} f_1} [\text{Wb}] \quad (4.6)$$

k_E ... poměr indukovaného napětí vinutí statoru k jmenovitému napětí [-]

U_{1N} ... jmenovité fázové napájecí napětí sítě [V]

N_1 ... počet závitů v sérii jedné fáze statorového vinutí [-]

f_1 ... kmitočet (frekvence) napájecího napětí [Hz]

Magnetická indukce ve vzduchové mezeře B_δ :

$$B_\delta = \frac{p_1 \Phi}{D l_i} [\text{T}] \quad (4.7)$$

p_1 ... počet pólů [-]

l_i ... ideální délka vzduchové mezery [m]

Drážková rozteč statoru t_{d1} :

$$t_{d1} = \frac{\pi D}{Q_1} [\text{m}] \quad (4.8)$$

Vnější průměr rotoru D_2 :

$$D_2 = D - 2\delta [\text{m}] \quad (4.9)$$

δ ... velikost vzduchové mezery [m]

Drážková rozteč rotoru t_{d2} :

$$t_{d2} = \frac{\pi D_2}{Q_2} [\text{m}] \quad (4.10)$$

Q_2 ... počet drážek na rotoru [-]

Magnetická indukce v zubech statoru B_{z1} :

$$B_{z1} = \frac{B_\delta t_{d1} l_i}{b_{z1} l_{Fe1} k_{Fe}} [\text{T}] \quad (4.11)$$

b_{z1} ... šířka zubu statoru [m]

l_{Fe1} ... aktivní délka statorového svazku [m]

k_{Fe} ... činitel plnění železa [-]

Magnetická indukce v zubech rotoru B_{z2} :

$$B_{z2} = \frac{B_\delta t_{d2} l_i}{b_{z2} l_{Fe2} k_{Fe}} [\text{T}] \quad (4.12)$$

b_{z2} ... šířka zubu rotoru [m]

l_{Fe2} ... aktivní délka rotorového svazku [m]

Hloubka satorové drážky h_{d1} :

$$h_{d1} = \frac{D_e - D}{2} - h_{j1} [m] \quad (4.13)$$

D_e ... vnější průměr statoru [m]

h_{j1} ... výška satorového jha [m]

Výpočtová výška jha statoru h'_{j1} :

$$h'_{j1} = \frac{D_e - D}{2} - h_{d1} - \frac{2}{3} d_{vk1} m_{vk1} [m] \quad (4.14)$$

d_{vk1} ... průměr axiálních ventilačních kanálů ve statoru [m]

m_{vk1} ... počet řad axiálních ventilačních kanálů ve statoru [-]

Hloubka rotorové drážky h_{d2} :

$$h_{d2} = h'_0 + h_0 + \frac{b_1}{2} + h_1 + \frac{b_2}{2} [m] \quad (4.15)$$

h'_0 ... výška můstku nad drážkou [m]

h_0 ... výška otevření rotorové drážky [m]

h_1 ... rozměr rotorové drážky [m]

b_1 ... rozměr rotorové drážky [m]

b_2 ... rozměr rotorové drážky [m]

Výpočtová výška jha rotoru h'_{j2} :

$$h'_{j2} = \frac{2 + p_1}{3,2 p_1} \left(\frac{D_2}{2} - h_{d2} \right) - \frac{2}{3} d_{vk2} m_{vk2} [m] \quad (4.16)$$

d_{vk2} ... průměr axiálních ventilačních kanálů v rotoru [m]

m_{vk2} ... počet řad axiálních ventilačních kanálů v rotoru [-]

Magnetická indukce ve jhu statoru B_{j1} :

$$B_{j1} = \frac{\Phi}{2 h'_{j1} l_{Fe1} k_{Fe}} [T] \quad (4.17)$$

Magnetická indukce ve jhu rotoru B_{j2} :

$$B_{j2} = \frac{\Phi}{2 h'_{j2} l_{Fe2} k_{Fe}} [T] \quad (4.18)$$

Koeficienty pro výpočet Carterova činitele γ_1 a γ_2 :

$$\gamma_1 = \frac{\left(\frac{b_{01}}{\delta} \right)^2}{5 + \left(\frac{b_{01}}{\delta} \right)} [-] \quad (4.19)$$

b_{01} ... otevření satorové drážky [m]

$$\gamma_2 = \frac{\left(\frac{b_{02}}{\delta}\right)^2}{5 + \left(\frac{b_{02}}{\delta}\right)} [-] \quad (4.20)$$

b_{02} ... otevření rotorové drážky [m]

Činitel vzduchové mezery (Carterův činitel) pro stator k_{c1} :

$$k_{c1} = \frac{t_{d1}}{t_{d1} - \gamma_1 \delta} [-] \quad (4.21)$$

Činitel vzduchové mezery (Carterův činitel) pro rotor k_{c2} :

$$k_{c2} = \frac{t_{d2}}{t_{d2} - \gamma_2 \delta} [-] \quad (4.22)$$

Výsledný Carterův činitel stroje k_c :

$$k_c = k_{c1} k_{c2} [-] \quad (4.23)$$

Magnetické napětí vzduchové mezery U_δ :

$$U_\delta = 1,59 \cdot 10^6 B_\delta k_c \delta [A] \quad (4.24)$$

Výpočtová výška zubu statoru a rotoru h_{z1} a h_{z2} :

$$h_{z1} = h_{d1} - 0,1b_1 [m] \quad (4.25)$$

$$h_{z2} = h_{d2} - 0,1b_2 [m] \quad (4.26)$$

b_1 ... rozměr statorové drážky [m]

b_2 ... rozměr rotorové drážky [m]

Magnetické napětí zubů statoru U_{z1} :

$$U_{z1} = 2h_{z1}H_{z1} [A] \quad (4.27)$$

H_{z1} ... intenzita magnetického pole při magnetické indukci v zubech statoru B_{z1} určená podle magnetizační křivky použité elektrotechnické oceli [$A \cdot m^{-1}$]

Magnetické napětí zubů rotoru U_{z2} :

$$U_{z2} = 2h_{z2}H_{z2} [A] \quad (4.28)$$

H_{z2} ... intenzita magnetického pole při magnetické indukci v zubech rotoru B_{z2} určená podle magnetizační křivky použité elektrotechnické oceli [$A \cdot m^{-1}$]

Činitel nasycení zubů k_z :

$$k_z = 1 + \frac{U_{z1} + U_{z2}}{U_\delta} [-] \quad (4.29)$$

Vnitřní průměr rotorového svazku D_i :

$$D_i = D_h \text{ [m]} \quad (4.30)$$

D_h ... průměr hřídele [m]

Výška rotorového jha h_{j2} :

$$h_{j2} = \frac{D_2 - D_i}{2} - h_{d2} \text{ [m]} \quad (4.31)$$

Délka střední magnetické indukční čáry ve jhu statoru l_{j1} :

$$l_{j1} = \frac{\pi(D_e - h_{j1})}{2p_1} \text{ [m]} \quad (4.32)$$

Délka střední magnetické indukční čáry ve jhu rotoru l_{j2} :

$$l_{j2} = \frac{\pi(D_h + h_{j2})}{2p_1} \text{ [m]} \quad (4.33)$$

Magnetické napětí jha statoru U_{j1} :

$$U_{j1} = l_{j1} H_{j1} \text{ [A]} \quad (4.34)$$

H_{j1} ... intenzita magnetického pole při magnetické indukci ve statorovém jhu B_{j1} určená podle magnetizační křivky použité elektrotechnické oceli [$\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$]

Magnetické napětí jha rotoru U_{j2} :

$$U_{j2} = l_{j2} H_{j2} \text{ [A]} \quad (4.35)$$

H_{j2} ... intenzita magnetického pole při magnetické indukci v rotorovém jhu B_{j2} určená podle magnetizační křivky použité elektrotechnické oceli [$\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$]

Výsledné magnetické napětí celého magnetického obvodu (na jednu pólovou dvojici) F_m :

$$F_m = U_\delta + U_{z1} + U_{z2} + U_{j1} + U_{j2} \text{ [A]} \quad (4.36)$$

Činitel nasycení magnetického obvodu k_μ :

$$k_\mu = \frac{F_m}{U_\delta} [-] \quad (4.37)$$

Magnetizační proud I_μ :

$$I_\mu = \frac{p F_m}{0,9 m_1 N_1 k_{v1}} \text{ [A]} \quad (4.38)$$

4.2 Odpory a reaktance asynchronního stroje

4.2.1 Odpor vinutí statoru R_1 [Ω]

Průřez vodiče cívky statorového vinutí S_1 :

$$S_1 = \pi \left(\frac{d_1}{2} \right)^2 [m^2] \quad (4.39)$$

d_1 ... průměr vodiče cívky statorového vinutí [m]

Střední délka závitu vinutí l_{av} :

$$l_{av} = 2(l_d + l_\xi) [m] \quad (4.40)$$

l_d ... délka drážkové části [m] (odpovídá konstrukční délce statorového, resp. rotorového svazku - $l_d = l_{1(2)}$ [m])

l_ξ ... délka čela cívky [m]

Celková délka efektivních vodičů jedné fáze vinutí L :

$$L = l_{av} N_1 [m] \quad (4.41)$$

N_1 ... počet závitů v sérii jedné fáze [-]

Odpor vinutí statoru R_1 :

$$R_1 = k_\sim \rho_\theta \frac{L}{S_1 a} [\Omega] \quad (4.42)$$

k_\sim ... činitel zvětšení odporu působením povrchového jevu [-]

ρ_θ ... rezistivita materiálu vinutí při uvažované teplotě [$\Omega \cdot m$]

a ... počet paralelních větví vinutí [-]

4.2.2 Odpor vinutí rotoru R_2 [Ω]

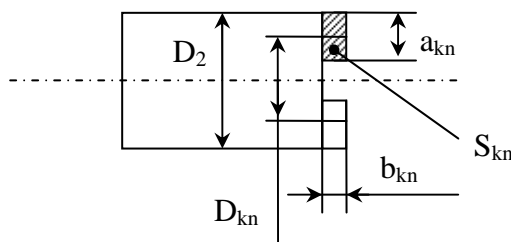
Odpor rotorové tyče R_t :

$$R_t = \rho_t \frac{l_t}{S_t} k_\sim [\Omega] \quad (4.43)$$

ρ_t ... rezistivita materiálu rotorové tyče při uvažované pracovní teplotě [$\Omega \cdot m$]

l_t ... celková délka rotorové tyče (odpovídající vzdálenosti mezi kruhy nakrátko) [m]

S_t ... průřez tyče rotoru [m^2]



Obr. č.7: Rozměry kruhu rotoru – podélný řez rotorem (převzato z [1])

Příčný průřez kruhů nakrátko S_{kn} :

$$S_{kn} = a_{kn} b_{kn} [m^2] \quad (4.44)$$

a_{kn} ... střední výška kruhů nakrátko [m]

b_{kn} ... střední šířka kruhů nakrátko [m]

Střední průměr kruhů nakrátko D_{kn} :

$$D_{kn} \approx D_2 - a_{kn} [m] \quad (4.45)$$

Odpor části kruhu nakrátko mezi dvěma sousedními tyčemi R_{kn} :

$$R_{kn} = \rho_{kn} \frac{\pi D_{kn}}{Q_2 S_{kn}} [\Omega] \quad (4.46)$$

ρ_{kn} ... rezistivita materiálu kruhu nakrátko při uvažované pracovní teplotě [$\Omega \cdot m$]

D_{kn} ... střední průměr kruhů nakrátko [m]

Činitel přepočtu proudů v kruhu na proud v tyči Δ :

$$\Delta = 2 \sin \frac{\pi p_1}{Q_2} [-] \quad (4.47)$$

Proud v kruhu nakrátko I_{kn} :

$$I_{kn} = \frac{I_t}{\Delta} = \frac{I_2}{\Delta} [A] \quad (4.48)$$

I_t ... proud v tyči rotoru [A]

Proud I_t je považován za rotorový proud a ve výpočtech se označuje I_2 [8].

Odvození vzorce pro výpočet R_2 :

$$R_2 I_t^2 = R_t I_t^2 + 2 R_{kn} I_{kn}^2 [W] \quad (4.49)$$

$$R_2 I_2^2 = R_t I_2^2 + 2 R_{kn} I_{kn}^2 [W]$$

$$R_2 I_2^2 = R_t I_2^2 + 2 R_{kn} \frac{I_2^2}{\Delta^2} [W]$$

$$R_2 I_2^2 = I_2^2 \left(R_t + \frac{2 R_{kn}}{\Delta^2} \right) [W]$$

$$R_2 = R_t + \frac{2 R_{kn}}{\Delta^2} [\Omega]$$

$$R_2 = R_t + \frac{2 R_{kn}}{\left(2 \sin \frac{\pi p_1}{Q_2} \right)^2} [\Omega] \quad (4.50)$$

Odvození přepočítacího činitele pro rotorové klecové vinutí p_z :

$$p_z = \frac{m_1 (N_1 k_{v1})^2}{m_2 (N_2 k_{v2})^2} [-] \quad (4.51)$$

počet fází rotoru	$m_2 = Q_2$	[-]
počet závitů vinutí každé fáze rotoru	$N_2 = \frac{1}{2}$	[-]
činitel rotorového vinutí	$k_{v2} = 1$	[-]

Tab. č.1: Zvláštnosti klecového rotorového vinutí[3]

$$p_z = \frac{m_1 (N_1 k_{v1})^2}{Q_2 \left(\frac{1}{2} \cdot 1\right)^2} [-]$$

$$p_z = \frac{m_1 (N_1 k_{v1})^2}{\frac{Q_2}{4}} [-]$$

$$p_z = \frac{4m_1 (N_1 k_{v1})^2}{Q_2} [-] \quad (4.52)$$

Přepočtený odpor vinutí rotoru na počet závitů statorového vinutí R_2' :

$$R_2' = R_2 p_z [\Omega] \quad (4.53)$$

4.2.3 Rozptylová reaktance fáze statorového vinutí $X_{1\sigma} [\Omega]$

Činitel magnetické vodivosti drážky statoru λ_{d1} :

$$\lambda_{d1} = \frac{h_3}{3b} k_\beta + \left(\frac{h_2}{b} + \frac{3h_1}{b+2b_0} + \frac{h_0}{b_0} \right) k_\beta' [-] \quad (4.54)$$

h_0 ... výška otevření statorové drážky [m]

h_1 ... rozměr statorové drážky [m]

h_2 ... rozměr statorové drážky [m]

h_3 ... rozměr statorové drážky [m]

b_0 ... otevření statorové drážky [m]

b ... rozměr statorové drážky [m]

k_β ... činitel závislý na kroku vinutí [-]

k_β' ... činitel závislý na kroku vinutí [-]

Při plném kroku dvouvrstvých vinutí a pro všechna jednovrstvá vinutí platí: $k_\beta = k_\beta' = 1 [-]$.

Poměrné zkrácení kroku vinutí β :

$$\beta = \frac{2}{3} \cdot \frac{q_1 + 1}{q_1} [-] \quad (4.55)$$

Výpočtová délka vzduchové mezery l_i' :

$$l_i' = l_i [\text{m}] \quad (4.56)$$

Činitel magnetické vodivosti rozptylu čel statoru λ_{c1} :

$$\lambda_{c1} = 0,34 \frac{q_1}{l_i'} (l_c - 0,64 \beta t_p) [-] \quad (4.57)$$

l_c ... délka čela cívky [m]

Činitel natočení drážek β_γ :

$$\beta_\gamma = \frac{b_\gamma}{t_{d2}} [-] \quad (4.58)$$

b_γ ... natočení drážek [m]

Činitel ξ_1 pro výpočet λ_{dif1} :

$$\xi_1 = 2k'_\gamma k_\beta - k_{v1}^2 \left(\frac{t_{d2}}{t_{d1}} \right)^2 (1 + \beta_\gamma^2) [-] \quad (4.59)$$

k'_γ ... činitel, který se určí z křivek na obr. 6.39e v závislosti na poměru t_{d2}/t_{d1} a poměrného natočení drážek β_γ [-]

k_β ... činitel, který se počítá ze vztahu 6.153

Činitel magnetické vodivosti diferenčního rozptylu statoru λ_{dif1} :

$$\lambda_{dif1} = \frac{t_{d1}}{12\delta k_c} \xi_1 [-] \quad (4.60)$$

Rozptylová reaktance fáze statorového vinutí $X_{1\sigma}$:

$$X_{1\sigma} = 15,8 \frac{f_1}{100} \left(\frac{N_1}{100} \right)^2 \frac{l_2'}{p_1 q_1} (\lambda_{d1} + \lambda_{\epsilon 1} + \lambda_{dif1}) [\Omega] \quad (4.61)$$

l_2' ... celková délka rotoru (konstrukční délka rotorového svazku) [m]

4.2.4 Rozptylová reaktance fáze rotorového vinutí $X_{2\sigma}$ [Ω]

Činitel magnetické vodivosti drážkového rozptylu rotorového klecového vinutí λ_{d2} :

$$\lambda_{d2} = \left[\frac{h_1}{3b} \left(1 - \frac{\pi b^2}{8S_t} \right) + 0,66 - \frac{b_0}{2b} \right] k_d + \frac{h_0}{b_0} [-] \quad (4.62)$$

h_0 ... výška otevření rotorové drážky [m]

h_1 ... rozměr rotorové drážky [m]

b_0 ... otevření rotorové drážky [m]

b ... rozměr rotorové drážky [m]

k_d ... činitel - pro jmenovitý chod = 1 [-]

Činitel magnetické vodivosti rozptylu čel rotoru $\lambda_{\epsilon 2}$:

$$\lambda_{\epsilon 2} = \frac{2,3D_{kn}}{Q_2 l_i' \Delta^2} \log \frac{4,7D_{kn}}{2a_{kn} + b_{kn}} [-] \quad (4.63)$$

Činitel ξ_2 pro výpočet λ_{dif2} :

$$\xi_2 = 1 + \frac{1}{5} \left(\frac{\pi p_1}{Q_2} \right)^2 - \frac{\Delta_z}{1 - \left(\frac{p_1}{Q_2} \right)^2} [-] \quad (4.64)$$

Δ_z ... se vyhledá se z křivek na obr. 6.39a

Činitel magnetické vodivosti diferenčního rozptylu klecového rotorového vinutí λ_{dif2} :

$$\lambda_{dif2} = \frac{t_{d2}}{12\delta k_c} \xi_2 [-] \quad (4.65)$$

Rozptylová reaktance fáze rotorového vinutí $X_{2\sigma}$:

$$X_{2\sigma} = 7,9 f_1 l_i' (\lambda_{d2} + \lambda_{e2} + \lambda_{dif2}) \cdot 10^{-6} [\Omega] \quad (4.66)$$

Přepočtená rozptylová reaktance fáze rotorového vinutí $X_{2\sigma}'$:

$$X_{2\sigma}' = X_{2\sigma} p_z [\Omega] \quad (4.67)$$

4.2.5 Vliv natočení drážek

Snížení indukovaného napětí U_{i1} vlivem natočení drážek se v praxi přímo nepočítá. Vliv natočení se uvažuje zvětšením rozptylových reaktancí statorového i rotorového vinutí $X_{1\sigma}$ a $X_{2\sigma}$ [8].

Přibližná hodnota činitele σ_γ :

$$\sigma_\gamma \approx 1 + 0,41 \left(\frac{b_\gamma}{t_p} \right)^2 \frac{U_{1N}}{X_{1\sigma} I_\mu} [-] \quad (4.68)$$

b_γ ... natočení drážek [m]

Rozptylová reaktance při natočených drážkách $X_{1\sigma\gamma}$ a $X_{2\sigma\gamma}$:

$$X_{1\sigma\gamma} = X_{1\sigma} \sigma_\gamma [\Omega] \quad (4.69)$$

$$X_{2\sigma\gamma} = X_{2\sigma} \sigma_\gamma [\Omega] \quad (4.70)$$

4.3 Celkové ztráty v železe asynchronních motorů $\Delta P_{Fe} [\Omega]$

Minimální a maximální šířka statorového zubu b_{z1min} a b_{z1max} :

$$b_{z1min} = t_{d1} - b_{d1} [m] \quad (4.71)$$

b_{d1} ... šířka statorové drážky [m]

$$b_{z1max} = t_{d1} \left(1 + \frac{2h_{d1}}{D} \right) - b_{d1} [m] \quad (4.72)$$

Střední šířka zubu statoru b_{z1av} :

$$b_{z1av} = \frac{b_{z1min} + b_{z1max}}{2} [m] \quad (4.73)$$

Magnetické indukce v různých průřezích statorového zubu B_{z1min} a B_{z1max} :

$$B_{z1min} = \frac{B_\delta t_{d1} l_i}{b_{z1max} l_{Fe1} k_{Fe}} [T] \quad (4.74)$$

$$B_{z1\max} = \frac{B_{\delta} t_{d1} l_i}{b_{z1\min} l_{Fe1} k_{Fe}} [T] \quad (4.75)$$

Střední magnetická indukce v zubech statoru B_{z1av} :

$$B_{z1av} = \frac{B_{z1\min} + B_{z1\max}}{2} [T] \quad (4.76)$$

Minimální šířka rotorového zubu $b_{z2\min}$:

$$b_{z2\min} = \frac{\pi(D_2 - 2h_{d2})}{Q_2} - b_{d2} [m] \quad (4.77)$$

Pro výpočet $b_{z2\min}$ se hloubka rotorové drážky h_{d2} rovná výšce zubů rotoru h_{z2} :

$$h_{d2} = h_{z2} [m] \quad (4.78)$$

b_{d2} ... šířka rotorové drážky [m]

Maximální šířka rotorového zubu $b_{z2\max}$:

$$b_{z2\max} = \frac{\pi[D_2 - 2(h_0 + h_k)]}{Q_2} - b_{d2} [m] \quad (4.79)$$

h_k ... rozměr rotorové drážky [m]

Střední šířka zubu rotoru b_{z2av} :

$$b_{z2av} = \frac{b_{z2\min} + b_{z2\max}}{2} [m] \quad (4.80)$$

Magnetické indukce v různých průřezích rotorového zubu $B_{z2\min}$ a $B_{z2\max}$:

$$B_{z2\min} = \frac{B_{\delta} t_{d2} l_i}{b_{z2\max} l_{Fe2} k_{Fe}} [T] \quad (4.81)$$

$$B_{z2\max} = \frac{B_{\delta} t_{d2} l_i}{b_{z2\min} l_{Fe2} k_{Fe}} [T] \quad (4.82)$$

Střední magnetická indukce v zubech rotoru B_{z2av} :

$$B_{z2av} = \frac{B_{z2\min} + B_{z2\max}}{2} [T] \quad (4.83)$$

Hmotnost železa statorového jha m_{j1} :

$$m_{j1} = \pi(D_e - h_{j1})h_{j1}l_{Fe1}k_{Fe}\gamma_{Fe} [kg] \quad (4.84)$$

γ_{Fe} ... hustota oceli ($\gamma_{Fe} = 7,8 \cdot 10^3 \text{ kg.m}^{-3}$)

Hmotnost zubů statoru a rotoru m_{z1} a m_{z2} :

$$m_{z1} \cong h_{z1}b_{z1av}Q_1l_{Fe1}k_{Fe}\gamma_{Fe} [kg] \quad (4.85)$$

h_{z1} ... výpočtová výška zubu statoru [m]

$$m_{z2} = h_{z2} b_{z2av} Q_2 l_{Fe2} k_{Fe} \gamma_{Fe} [kg] \quad (4.86)$$

h_{z2} ... výpočtová výška zubu rotoru [m]

Hlavní ztráty v železe statoru ΔP_{Feh} :

$$\Delta P_{Feh} = \Delta p_{1,0} \left(\frac{f_1}{50} \right)^\beta (k_{dj} B_{j1}^2 m_{j1} + k_{dz} B_{z1av}^2 m_{z1}) [W] \quad (4.87)$$

$\Delta p_{1,0}$... měrné ztráty v železe [$W \cdot kg^{-1}$]

β ... exponent závislý na druhu použité oceli [-]

k_{dj} , k_{dz} ... činitele uvažující vliv nerovnoměrnosti rozložení toku v částech magnetického obvodu a vliv technologie výroby statorového svazku [-]

Činitele β_{01} a β_{02} :

$$\beta_{01} = f \left(\frac{b_{02}}{\delta} \right) [-] \quad (4.88)$$

b_{02} ... otevření rotorové drážky [m]

$$\beta_{02} = f \left(\frac{b_{01}}{\delta} \right) [-] \quad (4.89)$$

b_{01} ... otevření statorové drážky [m]

Amplituda pulzací magnetické indukce ve vzduchové mezeře nad hlavami zubů statoru a rotoru B_{01} a B_{02} :

$$B_{01} = \beta_{01} k_c B_\delta [T] \quad (4.90)$$

$$B_{02} = \beta_{02} k_c B_\delta [T] \quad (4.100)$$

Hustota povrchových ztrát statoru a rotoru $p_{\delta p1}$ a $p_{\delta p2}$:

$$p_{\delta p1} = 0,5 k_{01} \left(\frac{Q_2 n}{10000} \right)^{1,5} (B_{01} t_{d2} 10^3)^2 [W \cdot m^{-2}] \quad (4.101)$$

$$p_{\delta p2} = 0,5 k_{02} \left(\frac{Q_1 n}{10000} \right)^{1,5} (B_{02} t_{d1} 10^3)^2 [W \cdot m^{-2}] \quad (4.102)$$

k_{01} , k_{02} ... činitele respektující vliv opracování povrchu hlav zubů statoru a rotoru [-]

n ... otáčky rotoru [min^{-1}]

Celkové povrchové ztráty ve statoru a rotoru $\Delta P_{\delta p1}$ a $\Delta P_{\delta p2}$:

$$\Delta P_{\delta p1} = p_{\delta p1} (t_{d1} - b_{01}) Q_1 l_{Fe1} [W] \quad (4.103)$$

$$\Delta P_{\delta p2} = p_{\delta p2} (t_{d2} - b_{02}) Q_2 l_{Fe2} [W] \quad (4.104)$$

Pokud jsou na statoru nebo na rotoru otevřené drážky, dosazuje se do vztahů pro γ_1 a γ_2 (1.19) a (1.20) místo otevření b_{01} nebo b_{02} , tzv. náhradní otevření b'_{01} a b'_{02} [1].

Náhradní otevření b'_{01} a b'_{02} :

$$b'_{01} = \frac{b_{01}}{3} \left(1 + \frac{0,5t_{d1}}{t_{d1}b_{01} + \kappa_{\delta}} \right) [m] \quad (4.105)$$

Hodnoty činitele κ_{δ} v závislosti na poměru b_d/δ pro otevřené drážky jsou vyneseny v křivce na obr. 6. 42[1].

b_d ... šířka drážky [m]

$$b'_{02} = \frac{b_{02}}{3} \left(1 + \frac{0,5t_{d2}}{t_{d2}b_{02} + \kappa_{\delta}} \right) [m] \quad (4.106)$$

Amplituda pulzací magnetické indukce ve středním průřezu zubu statoru a rotoru B_{p1} a B_{p2} :

$$B_{p1} \approx \frac{\gamma_2 \delta}{2t_{d1}} B_{z1av} [T] \quad (4.107)$$

$$B_{p2} \approx \frac{\gamma_1 \delta}{2t_{d2}} B_{z2av} [T] \quad (4.108)$$

Pulzní ztráty v zubech statoru a rotoru ΔP_{p1} a ΔP_{p2} :

$$\Delta P_{p1} \approx 0,11 \left(\frac{Q_2 n}{1000} B_{p1} \right)^2 m_{z1} [W] \quad (4.109)$$

$$\Delta P_{p2} \approx 0,11 \left(\frac{Q_1 n}{1000} B_{p2} \right)^2 m_{z2} [W] \quad (4.110)$$

Dodatečné ztráty v železe ΔP_{Fed} :

$$\Delta P_{Fed} = \Delta P_{\delta p1} + \Delta P_{\delta p2} + \Delta P_{p1} + \Delta P_{p2} [W] \quad (4.111)$$

Celkové ztráty v železe asynchronních motorů ΔP_{Fe} :

$$\Delta P_{Fe} = \Delta P_{Feh} + \Delta P_{Fed} [W] \quad (4.112)$$

4.4 Mechanické a ventilační ztráty ΔP_{mech} [W]

Činitel K_T pro výpočet ΔP_{mech} :

$$K_T = 1,3(1 - D_e) [-] \quad (4.113)$$

Mechanické a ventilační ztráty ΔP_{mech} :

$$\Delta P_{mech} = K_T \left(\frac{n}{10} \right)^2 D_e^4 [W] \quad (4.114)$$

4.5 Elektrické ztráty ve statorovém vinutí při chodu naprázdno (Jouleovy ztráty) ΔP_{j0} [W]

Vzorec pro výpočet Jouleových ztrát ve statorovém vinutí při chodu naprázdno ΔP_{j0} :

$$\Delta P_{j0} \approx m_1 R_1 I_{\mu}^2 [W] \quad (4.115)$$

4.6 Proud naprázdno motoru I_0 [A]

Jalová složka proudu naprázdno I_{0j} :

$$I_{0j} \approx I_\mu \text{ [A]} \quad (4.116)$$

Činná (aktivní) složka proudu naprázdno $I_{0\epsilon}$:

$$I_{0\epsilon} = \frac{\Delta P_{Fe} + \Delta P_{mech} + \Delta P_{j0}}{m_1 U_{1N}} \text{ [A]} \quad (4.117)$$

Při výpočtu $I_{0\epsilon}$ se předpokládá, že ztráty v železe, třením a ventilační při chodu naprázdno jsou stejné jako při jmenovitém chodu.

$$I_{0\epsilon} = I_{Fe} \text{ [A]} \quad (4.118)$$

Proud naprázdno motoru I_0 :

$$I_0 = \sqrt{I_{0\epsilon}^2 + I_{0j}^2} \text{ [A]} \quad (4.119)$$

Účinník při chodu naprázdno $\cos\varphi_0$:

$$\cos\varphi_0 = \frac{I_{0\epsilon}}{I_0} [-] \quad (4.120)$$

5 VÝPOČET PARAMETRŮ PRO MOTOR TM90-4S[7]

Postupným dosazováním velikostí údajů z dokumentace k 3f motoru do připravených vzorců byly vypočítány parametry náhradního schématu podle kapitoly 4.

Štítkové údaje 3f asynchronního motoru TM90-4S:

Motor	TM90-4S	3~50Hz; 1100W; 400/230V; $\cos\varphi=0,83$; 1400 min-1	EMP Slavkov
-------	---------	--	-------------

$$2p_1 = 4 \Rightarrow p_1 = 2 [-]$$

$$t_p = \frac{\pi D}{2p_1} = \frac{\pi \cdot 84 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 2} = 65,973 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$k_{y1} = \sin\left(\frac{y}{t_p} \cdot \frac{\pi}{2}\right) = \sin\left(1 \cdot \frac{\pi}{2}\right) = 1 [-]$$

$$q_1 = \frac{Q_1}{2p_1 m_1} = \frac{36}{2 \cdot 2 \cdot 3} = 3 [-]$$

$$k_{r1} = \frac{0,5}{q_1 \cdot \sin \frac{30^\circ}{q_1}} = \frac{0,5}{3 \cdot \sin \frac{30^\circ}{3}} = 0,96 [-]$$

$$k_{v1} = k_{y1} k_{r1} = 1 \cdot 0,96 = 0,96 [-]$$

$$k_B = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1,111 [-]$$

$$U_{1N} = \frac{U_N}{\sqrt{3}} = \frac{400}{\sqrt{3}} = 230,94 \text{ V}$$

$$\Phi = \frac{k_E U_{1N}}{4k_B N_1 k_{v1} f_1} = \frac{0,96 \cdot 230,94}{4 \cdot 1,111 \cdot 390 \cdot 0,96 \cdot 50} = 2,665 \cdot 10^{-3} \text{ Wb}$$

Hodnota koeficientu k_E byla odečtena z grafu[8]. Velikost počtu závitů v sérii jedné fáze statorového vinutí N_1 byla vypočítána z poskytnuté dokumentace k motoru TM90-4S[7]. Jedná se o dvě trojčívky po 65 závitěch zapojené do série.

$$N_1 = 2 \times 3 \times 65 = 390 (-)$$

$$B_\delta = \frac{p_1 \Phi}{D l_i} = \frac{2 \cdot 2,665 \cdot 10^{-3}}{84 \cdot 10^{-3} \cdot 78 \cdot 10^{-3}} = 0,813 \text{ T}$$

$$t_{d1} = \frac{\pi D}{Q_1} = \frac{\pi \cdot 84 \cdot 10^{-3}}{36} = 7,33 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$D_2 = D - 2\delta = 84 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 0,25 \cdot 10^{-3} = 83,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$t_{d2} = \frac{\pi D_2}{Q_2} = \frac{\pi \cdot 83,5 \cdot 10^{-3}}{28} = 9,369 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$b_{z1av} = \frac{b_{z1min} + b_{z1max}}{2} = \frac{3,716 \cdot 10^{-3} + 3,721 \cdot 10^{-3}}{2} = 3,719 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$B_{z1av} = \frac{B_\delta t_{d1} l_i}{b_{z1av} l_{Fe1} k_{Fe}} = \frac{0,813 \cdot 7,33 \cdot 10^{-3} \cdot 78 \cdot 10^{-3}}{3,719 \cdot 10^{-3} \cdot 78 \cdot 10^{-3} \cdot 0,97} = 1,652 \text{ T}$$

Činitel plnění železa k_{Fe} [-] byl odečten z [8] - byla zvolena vrstva oxidu.

$$b_{z2av} = \frac{b_{z2min} + b_{z2max}}{2} = \frac{4,692 \cdot 10^{-3} + 4,704 \cdot 10^{-3}}{2} = 4,698 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$B_{z2av} = \frac{B_\delta t_{d2} l_i}{b_{z2av} l_{Fe2} k_{Fe}} = \frac{0,813 \cdot 9,369 \cdot 10^{-3} \cdot 78 \cdot 10^{-3}}{4,698 \cdot 10^{-3} \cdot 78 \cdot 10^{-3} \cdot 0,97} = 1,671 \text{ T}$$

$$h_{d1} = \frac{D_e - D}{2} - h_{j1} = \frac{135 \cdot 10^{-3} - 84 \cdot 10^{-3}}{2} - 11,85 \cdot 10^{-3} = 13,65 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$h'_{j1} = \frac{D_e - D}{2} - h_{d1} = \frac{135 \cdot 10^{-3} - 84 \cdot 10^{-3}}{2} - 13,65 \cdot 10^{-3} = 11,85 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$h_{d2} = h'_0 + h_0 + \frac{b_1}{2} + h_1 + \frac{b_2}{2} [m]$$

Velikost hloubky rotorové drážky byla odečteno z dokumentace: $h_{d2} = 14,45 \cdot 10^{-3} \text{ m}$

$$h'_{j2} = \frac{2 + p_1}{3,2 p_1} \left(\frac{D_2}{2} - h_{d2} \right) = \frac{2 + 2}{3,2 \cdot 2} \left(\frac{83,5 \cdot 10^{-3}}{2} - 14,45 \cdot 10^{-3} \right) = \underline{17,063 \cdot 10^{-3} \text{ m}}$$

$$B_{j1} = \frac{\Phi}{2 h'_{j1} l_{Fe1} k_{Fe}} = \frac{2,665 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 11,85 \cdot 10^{-3} \cdot 78 \cdot 10^{-3} \cdot 0,97} = \underline{1,486 \text{ T}}$$

$$B_{j2} = \frac{\Phi}{2 h'_{j2} l_{Fe2} k_{Fe}} = \frac{2,665 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 17,063 \cdot 10^{-3} \cdot 78 \cdot 10^{-3} \cdot 0,97} = \underline{1,032 \text{ T}}$$

$$\gamma_1 = \frac{\left(\frac{b_{01}}{\delta} \right)^2}{5 + \left(\frac{b_{01}}{\delta} \right)} = \frac{\left(\frac{2,4 \cdot 10^{-3}}{0,25 \cdot 10^{-3}} \right)^2}{5 + \left(\frac{2,4 \cdot 10^{-3}}{0,25 \cdot 10^{-3}} \right)} = \underline{6,312 [-]}$$

$$\gamma_2 = \frac{\left(\frac{b_{02}}{\delta} \right)^2}{5 + \left(\frac{b_{02}}{\delta} \right)} = \frac{\left(\frac{1 \cdot 10^{-3}}{0,25 \cdot 10^{-3}} \right)^2}{5 + \left(\frac{1 \cdot 10^{-3}}{0,25 \cdot 10^{-3}} \right)} = \underline{1,778 [-]}$$

$$k_{c1} = \frac{t_{d1}}{t_{d1} - \gamma_1 \delta} = \frac{7,33 \cdot 10^{-3}}{7,33 \cdot 10^{-3} - 6,312 \cdot 0,25 \cdot 10^{-3}} = \underline{1,274 [-]}$$

$$k_{c2} = \frac{t_{d2}}{t_{d2} - \gamma_2 \delta} = \frac{9,369 \cdot 10^{-3}}{9,369 \cdot 10^{-3} - 1,778 \cdot 0,25 \cdot 10^{-3}} = \underline{1,05 [-]}$$

$$k_c = k_{c1} k_{c2} = 1,274 \cdot 1,05 = \underline{1,338 [-]}$$

$$U_\delta = 1,59 \cdot 10^6 B_\delta k_c \delta = 1,59 \cdot 10^6 \cdot 0,813 \cdot 1,338 \cdot 0,25 \cdot 10^{-3} = \underline{432,398 \text{ A}}$$

$$h_{z1} = h_{d1} - 0,1 b_1 = 13,65 \cdot 10^{-3} - 0,1 \cdot 5,5 \cdot 10^{-3} = \underline{13,1 \cdot 10^{-3} \text{ m}}$$

$$h_{z2} = h_{d2} - 0,1 b_2 = 14,45 \cdot 10^{-3} - 0,1 \cdot 1,6 \cdot 10^{-3} = \underline{14,29 \cdot 10^{-3} \text{ m}}$$

$$U_{z1} = 2 h_{z1} H_{z1} = 2 \cdot 13,1 \cdot 10^{-3} \cdot 2860 = \underline{74,932 \text{ A}}$$

Velikost H_{z1} byla odečtena z BH křivky materiálu M700-50A[5] pro B_{z1av} .

Pozn.: BH křivka materiálu M700-50A je uvedena v příloze.

$$U_{z2} = 2 h_{z2} H_{z2} = 2 \cdot 14,29 \cdot 10^{-3} \cdot 3350 = \underline{95,743 \text{ A}}$$

Velikost H_{z2} byla odečtena z BH křivky materiálu M700-50A[5] pro B_{z2av} .

$$k_z = 1 + \frac{U_{z1} + U_{z2}}{U_\delta} = 1 + \frac{26,331 + 30,438}{432,398} = \underline{1,131 [-]}$$

Vnitřní průměr rotorového svazku: $D_i = D_h = \underline{30 \cdot 10^{-3} \text{ m}}$

$$h_{j2} = \frac{D_2 - D_i}{2} - h_{d2} = \frac{83,5 \cdot 10^{-3} - 30 \cdot 10^{-3}}{2} - 14,45 \cdot 10^{-3} = \underline{12,3 \cdot 10^{-3} \text{ m}}$$

$$l_{j1} = \frac{\pi(D_e - h_{j1})}{2p_1} = \frac{\pi(135 \cdot 10^{-3} - 11,85 \cdot 10^{-3})}{2 \cdot 2} = 96,722 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$l_{j2} = \frac{\pi(D_h + h_{j2})}{2p_1} = \frac{\pi(30 \cdot 10^{-3} + 12,3 \cdot 10^{-3})}{2 \cdot 2} = 33,222 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$U_{j1} = l_{j1} H_{j1} = 96,722 \cdot 10^{-3} \cdot 610 = 59 \text{ A}$$

Velikost H_{j1} byla odečtena z BH křivky materiálu M700-50A[5] pro B_{j1} .

$$U_{j2} = l_{j2} H_{j2} = 33,222 \cdot 10^{-3} \cdot 168 = 5,581 \text{ A}$$

Velikost H_{j2} byla odečtena z BH křivky materiálu M700-50A[5] pro B_{j2} .

$$F_m = U_\delta + U_{z1} + U_{z2} + U_{j1} + U_{j2} \text{ [A]}$$

$$F_m = 432,398 + 74,932 + 95,743 + 59 + 5,581 = 667,654 \text{ A}$$

$$k_\mu = \frac{F_m}{U_\delta} = \frac{667,654}{432,398} = 1,544 \text{ [-]}$$

$$I_\mu = \frac{p_1 F_m}{0,9 m_1 N_1 k_{v1}} = \frac{2 \cdot 667,654}{0,9 \cdot 3 \cdot 390 \cdot 0,96} = 1,321 \text{ A}$$

$$S_1 = \pi \left(\frac{d_1}{2} \right)^2 = \pi \left(\frac{0,475 \cdot 10^{-3}}{2} \right)^2 = 1,772 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \quad (2.0)$$

Průměr vodiče cívky statorového vinutí d_1 [m] byl odečten z dokumentace k TM90-4S[7].

$$l_{vni_3} = 2(l_{d1_vni} + l_{\check{c}1_vni}) + 2(l_{d2_vni} + l_{\check{c}2_vni}) + 2(l_{d3_vni} + l_{\check{c}3_vni}) \text{ [m]}$$

$$l_{vni_3} = 2(56 \cdot 10^{-3} + 122 \cdot 10^{-3}) + 2(72 \cdot 10^{-3} + 136 \cdot 10^{-3}) + 2(90 \cdot 10^{-3} + 138 \cdot 10^{-3})$$

$$l_{vni_3} = 1,228 \text{ m}$$

$$l_{vne_3} = 2(l_{d1_vne} + l_{\check{c}1_vne}) + 2(l_{d2_vne} + l_{\check{c}2_vne}) + 2(l_{d3_vne} + l_{\check{c}3_vne})$$

$$l_{vne_3} = 2(56 \cdot 10^{-3} + 130 \cdot 10^{-3}) + 2(72 \cdot 10^{-3} + 136 \cdot 10^{-3}) + 2(90 \cdot 10^{-3} + 146 \cdot 10^{-3})$$

$$l_{vne_3} = 1,26 \text{ m}$$

$$l_{celk} = l_{vni_3} + l_{vne_3} = 1,228 + 1,26 = 2,488 \text{ m}$$

$l_{d1_vni-d3_vni}$, $l_{d1_vne-d3_vne}$... délky jednotlivých stran trojčívky [m]

$l_{\check{c}1_vni-\check{c}3_vni}$, $l_{\check{c}1_vni-\check{c}3_vni}$... délky jednotlivých čel trojčívky [m]

$l_{d1_vni-d3_vni}$, $l_{d1_vne-d3_vne}$... délky jednotlivých stran trojčívky [m]

l_{vni_3} , l_{vne_3} ... délka vodiče trojčívek [m]

l_{celk} ... celková délka vodičů obou trojčívek [m]

Velikost $\rho_{Cu75^\circ C} = (1/47) \cdot 10^{-6} \Omega \cdot m$ byla odečtena z [8].

$$R_1 = 1 \cdot \frac{1}{47} \cdot 10^{-6} \cdot \frac{2,488 \cdot 65}{1,772 \cdot 10^{-7} \cdot 2} = \underline{\underline{9,709 \, \Omega}}$$

V vzorci je zohledněno zapojení dvou trojčívek jedné fáze statoru do série a 2 paralelní větve ($a = 2[-]$).

Velikost průřezu rotorové tyče S_t bylo vypočítáno pomocí programu Femm: $S_t = 40,098 \, \text{mm}^2$

$$R_t = \rho_t \frac{l_t}{S_t} k_{\sim} = \frac{1}{21,5} \cdot 10^{-6} \cdot \frac{78 \cdot 10^{-3}}{40,098 \cdot 10^{-6}} \cdot 1 = \underline{\underline{9,048 \cdot 10^{-5} \, \Omega}}$$

Hodnota rezistivity materiálu rotorové tyče ρ_t [$\Omega \cdot \text{m}$] byla odečtena z [8].

$$\rho_t = (1/21,5) \cdot 10^{-6} \, \Omega \cdot \text{m}$$

$$S_{kn} = a_{kn} b_{kn} = 17,88 \cdot 10^{-3} \cdot 9,73 \cdot 10^{-3} = \underline{\underline{1,74 \cdot 10^{-4} \, \text{m}^2}}$$

Velikosti střední výšky kruhů nakrátko a_{kn} [m] a střední šířky kruhů nakrátko b_{kn} [m] byly změřeny přímo na reálném rotoru TM90-4S.

$$D_{kn} \approx D_2 - a_{kn} = 83,5 \cdot 10^{-3} - 17,88 \cdot 10^{-3} = \underline{\underline{65,62 \cdot 10^{-3} \, \text{m}}}$$

$$R_{kn} = \rho_{kn} \frac{\pi D_{kn}}{Q_2 S_{kn}} = \frac{1}{21,5} \cdot 10^{-6} \cdot \frac{\pi \cdot 65,62 \cdot 10^{-3}}{28 \cdot 1,74 \cdot 10^{-4}} = \underline{\underline{1,968 \cdot 10^{-6} \, \Omega}}$$

Uvažováno: $\rho_{kn} = \rho_t = (1/21,5) \cdot 10^{-6} \, \Omega \cdot \text{m}$.

$$\Delta = 2 \sin \frac{\pi p_1}{Q_2} = 2 \sin \frac{\pi \cdot 2}{28} = \underline{\underline{0,445 [-]}}$$

$$R_2 = R_t + \frac{2R_{kn}}{\left(2 \sin \frac{\pi p_1}{Q_2}\right)^2} = 9,048 \cdot 10^{-5} + \frac{2 \cdot 1,968 \cdot 10^{-6}}{\left(2 \sin \frac{\pi \cdot 2}{28}\right)^2} = \underline{\underline{1,104 \cdot 10^{-4} \, \Omega}}$$

$$p_z = \frac{4m_1 (N_1 k_{v1})^2}{Q_2} = \frac{4 \cdot 3 \cdot (390 \cdot 0,96)^2}{28} = \underline{\underline{60075,154 [-]}}$$

$$R_2' = R_2 p_z = 1,104 \cdot 10^{-4} \cdot 60075,154 = \underline{\underline{6,632 \, \Omega}}$$

Zvolen byl typ drážky f) podle [8].

$$\lambda_{d1} = \frac{h_3}{3b} k_{\beta} + \left(\frac{h_2}{b} + \frac{3h_1}{b+2b_0} + \frac{h_0}{b_0} \right) k_{\beta}' [-]$$

$$\lambda_{d1} = \frac{10,95 \cdot 10^{-3}}{3 \cdot 3,9 \cdot 10^{-3}} \cdot 1 + \left(\frac{0,5 \cdot 10^{-3}}{3,9 \cdot 10^{-3}} + \frac{3 \cdot 1 \cdot 10^{-3}}{3,9 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 2,4 \cdot 10^{-3}} + \frac{0,65 \cdot 10^{-3}}{2,4 \cdot 10^{-3}} \right) \cdot 1 = \underline{\underline{1,68 [-]}}$$

Při plném kroku dvouvrstvých vinutí a pro všechna jednovrstvá vinutí platí: $k_{\beta} = k_{\beta}' = 1 [-]$.

Uvažováno, že vinutí nemá zkrácený krok, takže: $\beta = 1$.

Výpočtová délka vzduchové mezery $l_i' = l_i = \underline{\underline{78 \cdot 10^{-3} \, \text{m}}}$.

$$\lambda_{\varepsilon 1} = 0,34 \frac{q_1}{l_i'} (l_{\varepsilon} - 0,64 \beta t_p) = 0,34 \cdot \frac{3}{78 \cdot 10^{-3}} \cdot (72,667 \cdot 10^{-3} - 0,64 \cdot 1 \cdot 65,973 \cdot 10^{-3}) = \underline{0,398 [-]}$$

Velikost délky čela cívky l_{ε} [m] byla vypočítána jako aritmetický průměr čel v dokumentaci[7] k TM90-4S.

Hodnota natočení drážek byla zvolena: $b_{\gamma} = 9,369 \cdot 10^{-3}$ m.

$$\xi_1 = 2k_{\gamma}' k_{\beta} - k_{v1}^2 \left(\frac{t_{d2}}{t_{d1}} \right)^2 (1 + \beta_{\gamma}^2) = 2 \cdot 2,25 \cdot 1 - 0,96^2 \left(\frac{9,369 \cdot 10^{-3}}{7,33 \cdot 10^{-3}} \right)^2 (1 + 1^2) = \underline{1,489 [-]}$$

Činitel k_{γ}' byl určen z [8] v závislosti na poměru t_{d2}/t_{d1} a poměrného natočení drážek β_{γ} [-] - odečteno k_{γ} je přibližně 2,25 [-].

$$\frac{t_{d2}}{t_{d1}} = \frac{9,369 \cdot 10^{-3}}{7,33 \cdot 10^{-3}} = \underline{1,278 [-]}$$

Činitel $k_{\beta} = 1$ - předpokládáno[8].

$$\lambda_{dif1} = \frac{t_{d1}}{12\delta k_c} \xi_1 = \frac{7,33 \cdot 10^{-3}}{12 \cdot 0,25 \cdot 10^{-3} \cdot 1,338} \cdot 1,489 = \underline{2,719 [-]}$$

$$X_{1\sigma} = 15,8 \frac{f_1}{100} \left(\frac{N_1}{100} \right)^2 \frac{l_2'}{p_1 q_1} (\lambda_{d1} + \lambda_{\varepsilon 1} + \lambda_{dif1}) [\Omega]$$

$$X_{1\sigma} = 15,8 \frac{50}{100} \left(\frac{390}{100} \right)^2 \frac{78 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 3} \cdot (1,68 + 0,398 + 2,719) = \underline{\underline{7,493 \Omega}}$$

Byl zvolen typ drážky a) podle [8].

$$\lambda_{d2} = \left[\frac{h_1}{3b} \left(1 - \frac{\pi b^2}{8S_t} \right)^2 + 0,66 - \frac{b_0}{2b} \right] k_d + \frac{h_0}{b_0} [-]$$

$$\lambda_{d2} = \left[\frac{12,232 \cdot 10^{-3}}{3 \cdot 4,211 \cdot 10^{-3}} \left(1 - \frac{\pi (4,211 \cdot 10^{-3})^2}{8 \cdot 40,098 \cdot 10^{-6}} \right)^2 + 0,66 - \frac{1 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 4,211 \cdot 10^{-3}} \right] \cdot 1 + \frac{0}{1 \cdot 10^{-3}} = \underline{1,202 [-]}$$

$$\lambda_{\varepsilon 2} = \frac{2,3 D_{kn}}{Q_2 l_i' \Delta^2} \log \frac{4,7 D_{kn}}{2 a_{kn} + b_{kn}} = \frac{2,3 \cdot 65,62 \cdot 10^{-3}}{28 \cdot 78 \cdot 10^{-3} \cdot 0,445^2} \log \frac{4,7 \cdot 65,62 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 17,88 \cdot 10^{-3} + 9,73 \cdot 10^{-3}} = \underline{0,29 [-]}$$

$$\frac{b_{02}}{\delta} = \frac{1 \cdot 10^{-3}}{0,25 \cdot 10^{-3}} = \underline{4 [-]}$$

$$\frac{b_{02}}{t_{d2}} = \frac{1 \cdot 10^{-3}}{9,369 \cdot 10^{-3}} = \underline{0,107 [-]}$$

$$\xi_2 = 1 + \frac{1}{5} \left(\frac{\pi p_1}{Q_2} \right)^2 - \frac{\Delta_z}{1 - \left(\frac{p_1}{Q_2} \right)^2} = 1 + \frac{1}{5} \left(\frac{\pi \cdot 2}{28} \right)^2 - \frac{0,025}{1 - \left(\frac{2}{28} \right)^2} = \underline{0,985 [-]}$$

Velikost Δ_z se vyhledá z křivek[8] - odečten $\Delta_z = 0,025$ (-).

$$\lambda_{dif2} = \frac{t_{d2}}{12\delta k_c} \xi_2 = \frac{9,369 \cdot 10^{-3}}{12 \cdot 0,25 \cdot 10^{-3} \cdot 1,338} \cdot 0,985 = \underline{3,076 [-]}$$

$$X_{2\sigma} = 7,9 f_1 l_i' (\lambda_{d2} + \lambda_{e2} + \lambda_{dif2}) \cdot 10^{-6} = 7,9 \cdot 50 \cdot 78 \cdot 10^{-3} \cdot (1,202 + 0,29 + 3,076) \cdot 10^{-6} = \underline{1,407 \cdot 10^{-4} \Omega}$$

$$X_{2\sigma}' = X_{2\sigma} p_z = 1,407 \cdot 10^{-4} \cdot 60075,154 = \underline{8,453 \Omega}$$

$$\sigma_\gamma \approx 1 + 0,41 \left(\frac{b_\gamma}{t_p} \right)^2 \frac{U_{1N}}{X_{1\sigma} I_\mu} = 1 + 0,41 \left(\frac{9,369 \cdot 10^{-3}}{65,973 \cdot 10^{-3}} \right)^2 \frac{230,94}{7,493 \cdot 1,321} = \underline{1,193 [-]}$$

$$X_{1\sigma\gamma} = X_{1\sigma} \sigma_\gamma = 7,493 \cdot 1,193 = \underline{8,939 \Omega}$$

$$X_{2\sigma\gamma}' = X_{2\sigma}' \sigma_\gamma = 8,453 \cdot 1,193 = \underline{10,084 \Omega}$$

$$m_{j1} = \pi(D_e - h_{j1}) h_{j1} l_{Fe1} k_{Fe} \gamma_{Fe} [kg]$$

$$m_{j1} = \pi(135 \cdot 10^{-3} - 11,85 \cdot 10^{-3}) \cdot 11,85 \cdot 10^{-3} \cdot 78 \cdot 10^{-3} \cdot 0,97 \cdot 7,8 \cdot 10^3 = \underline{2,706 kg}$$

γ_{Fe} ... hustota oceli ($\gamma_{Fe} = 7,8 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

$$m_{z1} \cong h_{z1} b_{z1av} Q_1 l_{Fe1} k_{Fe} \gamma_{Fe} [kg]$$

$$m_{z1} \cong h_{z1} b_{z1av} Q_1 l_{Fe1} k_{Fe} \gamma_{Fe} = 13,1 \cdot 10^{-3} \cdot 3,719 \cdot 10^{-3} \cdot 36 \cdot 78 \cdot 10^{-3} \cdot 0,97 \cdot 7,8 \cdot 10^3 = \underline{1,035 kg}$$

$$m_{z2} = h_{z2} b_{z2av} Q_2 l_{Fe2} k_{Fe} \gamma_{Fe} = 14,29 \cdot 10^{-3} \cdot 4,698 \cdot 10^{-3} \cdot 28 \cdot 78 \cdot 10^{-3} \cdot 0,97 \cdot 7,8 \cdot 10^3 = \underline{1,109 kg}$$

$$\Delta P_{Feh} = \Delta p_{1,0} \left(\frac{f_1}{50} \right)^\beta (k_{dj} B_{j1}^2 m_{j1} + k_{dz} B_{z1av}^2 m_{z1}) [W]$$

$$\Delta P_{Feh} = 2,57 \cdot \left(\frac{50}{50} \right)^\beta (1,6 \cdot 1,486^2 \cdot 2,706 + 1,8 \cdot 1,652^2 \cdot 1,035) = \underline{37,637 W}$$

Měrné ztráty v železe $\Delta p_{1,0} = 2,57 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$ byly odečteny z dokumentace k materiálu M700-50A[5].

$$\frac{b_{01}}{\delta} = \frac{2,4 \cdot 10^{-3}}{0,25 \cdot 10^{-3}} = \underline{9,6 [-]}$$

$$\frac{b_{02}}{\delta} = \frac{1 \cdot 10^{-3}}{0,25 \cdot 10^{-3}} = \underline{4 [-]}$$

$$\beta_{01} = f \left(\frac{b_{02}}{\delta} \right) [-]$$

$\beta_{01} = 0,27 [-]$ - odečteno z grafu[8]

$$\beta_{02} = f \left(\frac{b_{01}}{\delta} \right) [-]$$

$\beta_{02} = 0,4 [-]$ - odečteno z grafu[8]

$$B_{01} = \beta_{01} k_c B_\delta = 0,27 \cdot 1,338 \cdot 0,813 = \underline{0,294 \text{ T}}$$

$$B_{02} = \beta_{02} k_c B_\delta = 0,4 \cdot 1,338 \cdot 0,813 = \underline{0,435 \text{ T}}$$

$$p_{\delta p1} = 0,5 k_{01} \left(\frac{Q_2 n}{10000} \right)^{1,5} (B_{01} t_{d2} 10^3)^2 [W \cdot m^{-2}]$$

$$p_{\delta p1} = 0,5 \cdot 1,4 \left(\frac{28 \cdot 1500}{10000} \right)^{1,5} (0,294 \cdot 9,369 \cdot 10^{-3} \cdot 10^3)^2 = \underline{45,714 \text{ W} \cdot m^{-2}}$$

$$p_{\delta p2} = 0,5 k_{02} \left(\frac{Q_1 n}{10000} \right)^{1,5} (B_{02} t_{d1} 10^3)^2 [W \cdot m^{-2}]$$

$$p_{\delta p2} = 0,5 \cdot 1,5 \left(\frac{36 \cdot 1500}{10000} \right)^{1,5} (0,435 \cdot 7,33 \cdot 10^{-3} \cdot 10^3)^2 = \underline{95,684 \text{ W} \cdot m^{-2}}$$

$k_{01}, k_{02} \dots$ činitele respektující vliv opracování povrchu hlav zubů statoru a rotoru[8]
 $n \dots$ otáčky rotoru [min^{-1}] - zvoleno synchronní[8]

$$\Delta P_{\delta p1} = p_{\delta p1} (t_{d1} - b_{01}) Q_1 I_{Fe1} = 45,714 \cdot (7,33 \cdot 10^{-3} - 2,4 \cdot 10^{-3}) \cdot 36 \cdot 78 \cdot 10^{-3} = \underline{0,633 \text{ W}}$$

$$\Delta P_{\delta p2} = p_{\delta p2} (t_{d2} - b_{02}) Q_2 I_{Fe2} = 95,684 \cdot (9,369 \cdot 10^{-3} - 1 \cdot 10^{-3}) \cdot 28 \cdot 78 \cdot 10^{-3} = \underline{1,749 \text{ W}}$$

Náhradní otevření b'_{01} a b'_{02} nebylo uvažováno.

Koeficienty pro výpočet Carterova činitele $\gamma'_1 = \gamma_1$ a $\gamma'_2 = \gamma_2$.

$$B_{p1} \approx \frac{\gamma'_2 \delta}{2 t_{d1}} B_{z1av} = \frac{1,778 \cdot 0,25 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 7,33 \cdot 10^{-3}} \cdot 1,652 = \underline{0,05 \text{ T}}$$

$$B_{p2} \approx \frac{\gamma'_1 \delta}{2 t_{d2}} B_{z2av} = \frac{6,312 \cdot 0,25 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 9,369 \cdot 10^{-3}} \cdot 1,671 = \underline{0,141 \text{ T}}$$

$$\Delta P_{p1} \approx 0,11 \left(\frac{Q_2 n}{1000} B_{p1} \right)^2 m_{z1} = 0,11 \left(\frac{28 \cdot 1500}{1000} \cdot 0,05 \right)^2 \cdot 1,035 = \underline{0,502 \text{ W}}$$

$$\Delta P_{p2} \approx 0,11 \left(\frac{Q_1 n}{1000} B_{p2} \right)^2 m_{z2} = 0,11 \left(\frac{36 \cdot 1500}{1000} \cdot 0,141 \right)^2 \cdot 1,109 = \underline{7,072 \text{ W}}$$

$$\Delta P_{Fed} = \Delta P_{\delta p1} + \Delta P_{\delta p2} + \Delta P_{p1} + \Delta P_{p2} = 0,633 + 1,749 + 0,502 + 7,072 = \underline{9,956 \text{ W}}$$

$$\Delta P_{Fe} = \Delta P_{Feh} + \Delta P_{Fed} = 37,637 + 9,956 = \underline{47,593 \text{ W}}$$

$$K_T = 1,3(1 - D_e) = 1,3(1 - 135 \cdot 10^{-3}) = \underline{1,125 [-]}$$

$$\Delta P_{mech} = K_T \left(\frac{n}{10} \right)^2 D_e^4 = 1,125 \left(\frac{1500}{10} \right)^2 (135 \cdot 10^{-3})^4 = \underline{8,408 \text{ W}}$$

$$\Delta P_{j0} \approx m_1 R_1 I_\mu^2 = 3 \cdot 9,709 \cdot 1,321^2 = \underline{50,828 \text{ W}}$$

$$I_{0j} \approx I_\mu = \underline{1,321 \text{ A}}$$

$$I_{0\varnothing} = \frac{\Delta P_{Fe} + \Delta P_{mech} + \Delta P_{j0}}{m_1 U_{1N}} = \frac{47,593 + 8,408 + 50,828}{3 \cdot 230,94} = \underline{0,154 \text{ A}}$$

Při výpočtu $I_{0\varnothing}$ se předpokládá, že ztráty v železe, třením a ventilační při chodu naprázdno jsou stejné jako při jmenovitém chodu.

$$I_{0\varnothing} = I_{Fe} = \underline{0,154 \text{ A}}$$

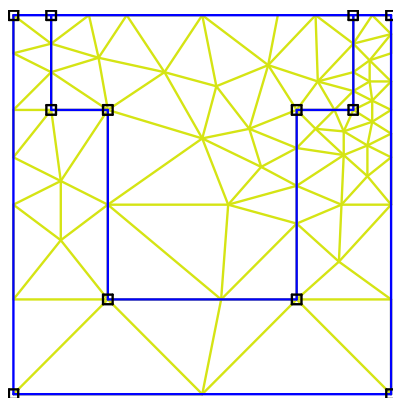
$$I_0 = \sqrt{I_{0\varnothing}^2 + I_{0j}^2} = \sqrt{0,154^2 + 1,321^2} = \underline{1,33 \text{ A}}$$

$$\cos \varphi_0 = \frac{I_{0\varnothing}}{I_0} = \frac{0,154}{1,33} = \underline{0,116 [-]}$$

6 METODA KONEČNÝCH PRVKŮ (MKP)

6.1 Obecně k metodě konečných prvků

Tato numerická metoda je založena na rozdělení spojitého kontinua do určitého konečného počtu prvků. Tímto způsobem vznikne síť elementů skládající se z propojených uzlů, ve kterých probíhá zjišťování výsledných parametrů. Pomocí této metody lze simulovat jevy v různých oborech lidské činnosti na vytvořeném fyzikálním modelu. Její principy jsou známy již delší dobu, avšak k rozšíření výpočtů pomocí metody konečných prvků bylo umožněno až s moderní výpočetní technikou, protože jsou výpočty modelů simulovaných pomocí této metody značně časově náročné. Rozsah výpočtů je ovlivněn počtem elementů, s jejichž rostoucím množstvím také roste výpočetní čas[9]. Mezi výpočetní programy sloužící k simulaci prostřednictvím fyzikálních modelů patří relativně jednoduchý na seznámení a práci program FEMM[11]. Pomocí této aplikace byly provedeny simulace obou zadaných asynchronních motorů.



Obr. č. 8: Ukázka sítě uzlů a elementů (mesh) v programu FEMM[11]

6.2 Simulace motorů v programu FEMM

Simulace 3f asynchronních motorů vychází z literatury[10], případně[11], kde se autoři zabývali modelováním asynchronních motorů pomocí MKP v programu FEMM. Pomocí daného postupu lze pomocí vytvořené geometrie provést výpočet sloužící k určení jednotlivých parametrů z náhradního schématu.

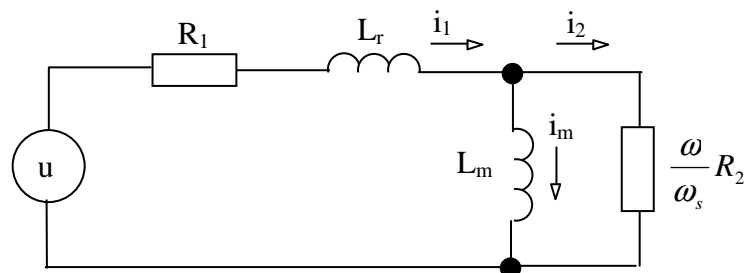
6.3 Vytvoření modelů motorů

Pro simulaci zadaných 3f asynchronních motorů[7] byl použit program FEMM[11], který slouží pro výpočty magnetických obvodů pomocí metody konečných prvků. Jednotlivé geometrie motorů byly nainportovány do programu přes výkresový formát .dxf. Pro simulaci bylo potřeba linearizovat použité materiály. Linearizace byla provedena pro všechny použité materiály. Simulace byly prováděny pomocí Lua skriptu pro frekvenci od 0,1 Hz do 5 Hz s krokem 0,5 Hz při respektování zadané hodnoty frekvence do $1,5 \times f_s$. Z každé série výpočtů pro oba simulované motory (TM90-4S a TM71-2S)[7] se potom následně vypočítávaly parametry náhradního schématu motoru.

6.4 Modelování asynchronního motoru TM90-4S a TM71-2S[7]

6.4.1 Náhradní schéma jedné fáze indukčního motoru v ustáleném stavu

Program FEMM umožňuje vypočítat magnetický tok ze zadané geometrie motoru a proudu protékajícím drážkami stroje. Jelikož je proud v modelu jednotkový, získaný magnetický tok bude odpovídat indukčnosti. Předpokládá se, že je v náhradním schématu konstantní kmitočet napájení a konstantní rychlost rotoru[10].



Obr. č.9: Náhradní schéma jedné fáze indukčního motoru v ustáleném stavu (převzato z [10])

6.4.2 Odvození momentu M [N·m] z náhradního schématu[10]:

Skluzová rychlost ω_s :

$$\omega_s = \omega_1 - \omega_2 \cdot p \text{ [rad} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (6.0)$$

ω_1 ... synchronní rychlost otáčivého pole [rad·s⁻¹]

ω_2 ... rychlost rotoru [rad·s⁻¹]

p ... počet pólpárů [-]

Celková impedance Z :

$$Z = R_1 + j\omega_1 L_r + \frac{j\omega_1 L_r \cdot \frac{\omega_1}{\omega_s} \cdot R_2}{j\omega_1 L_r + \frac{\omega_1}{\omega_s} \cdot R_2} \text{ [}\Omega\text{]} \quad (6.1)$$

R_1 ... prvek reprezentující ztráty [Ω]

L_r ... prvek reprezentující ztráty [H]

R_2 ... prvek reprezentující práci motoru na hřídeli [Ω]

Časová konstanta rotoru τ :

$$\tau = \frac{L_m}{R_2} [s] \quad (6.2)$$

L_m ... vzájemná indukčnost [H]

Úpravou předchozích rovnic lze získat:

$$Z = R_1 + j\omega_1 \left(L_r + \frac{L_m}{1 + j\tau\omega_s} \right) [\Omega] \quad (6.3)$$

Tok Φ libovolné fáze:

$$\phi = \left(L_r + \frac{L_m}{1 + j\tau\omega_s} \right) \cdot i [Wb] \quad (6.4)$$

Indukčnost závislá na skluzové frekvenci $L(\omega_s)$:

$$L(\omega_s) = \left(L_r + \frac{L_m}{1 + (\tau\omega_s)^2} \right) - j \left(\frac{\tau\omega_s L_m}{1 + (\tau\omega_s)^2} \right) [H] \quad (6.5)$$

Výkon na odporu:

$$P = 3 \left(\frac{\omega_1}{\omega_s} \right) R_2 |i_2|^2 = 3 \left(\frac{\omega_1 - \omega_s}{\omega_s} \right) R_2 |i_2|^2 + 3 R_2 |i_2|^2 [W] \quad (6.6)$$

Mechanický výkon P_{mech} :

$$P_{\text{mech}} = 3 \left(\frac{p \cdot \omega_2}{\omega_s} \right) R_2 |i_2|^2 [W] \quad (6.7)$$

Výraz pro moment M :

$$M = 3 \left(\frac{p R_2}{\omega_s} \right) |i_2|^2 [Nm] \quad (6.8)$$

Porovnávání napětí na magnetizační indukčnosti a odporu rotoru:

$$\left(\frac{\omega_1}{\omega_s} \right) R_2 i_2 = j\omega_1 L_m i_m \quad (6.9)$$

Vyjádření proudu i_2 :

$$i_2 = j\tau\omega_s i_m [A] \quad (6.10)$$

Vyjádření proudu i_1 :

$$i_1 = i_m + i_2 [A] \quad (6.11)$$

Získaný vztah pro proud i_2 :

$$i_2 = \left(\frac{j\tau\omega_s}{1 + j\tau\omega_s} \right) \cdot i_1 \text{ [A]} \quad (6.12)$$

Výsledný moment M :

$$M = 3pL_m i_1^2 \left(\frac{\tau\omega_s}{1 + (\tau\omega_s)^2} \right) \text{ [Nm]} \quad (6.13)$$

6.5 Výsledky simulací - výpočet momentu M

Výsledky z Lua skriptů:

A) Motor TM90-4S:

č. simulace	f [Hz]	M [Nm]	Φ_1 [Wb]	
			Re	Im
1	0,5	0,502847045	0,482622557	-0,15645916
2	1	0,730905333	0,368079865	-0,236084567
3	1,5	0,761675944	0,268271884	-0,248960179
4	2	0,712373052	0,199199782	-0,234094306
5	2,5	0,643508079	0,153820922	-0,212055455
6	3	0,576622879	0,123735383	-0,190319005
7	3,5	0,517634198	0,103229293	-0,171021398
8	4	0,467174396	0,088809092	-0,154459878
9	4,5	0,424322926	0,078362461	-0,140373317
10	5	0,387859182	0,070588862	-0,128379514

Tab. č. 2: Výsledné vypočítané hodnoty z Lua skriptů - TM90-4S

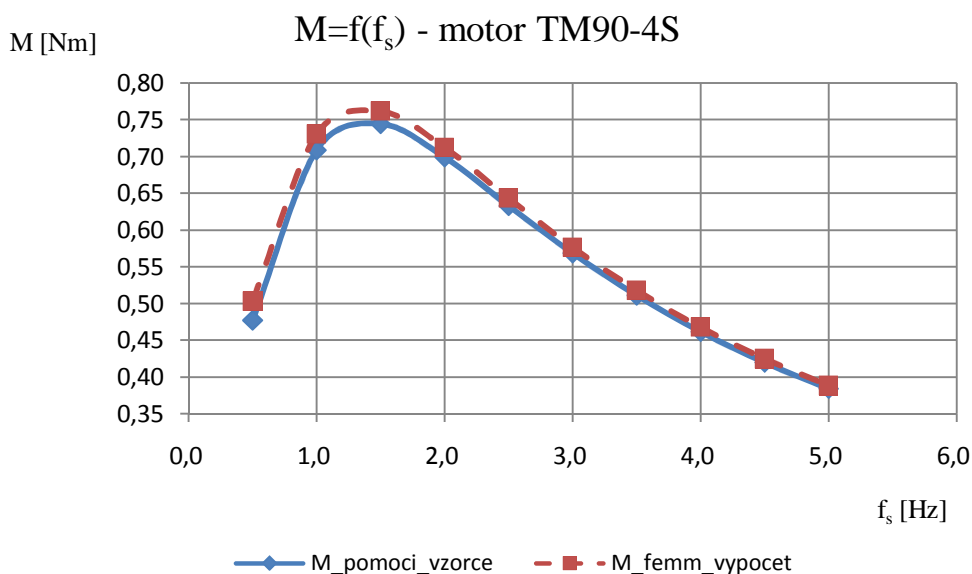
B) Motor TM71-2S:

č. simulace	f [Hz]	M [Nm]	Φ_1 [Wb]	
			Re	Im
1	0,5	0,779720152	1,338863594	-0,517549453
2	1	1,090722208	0,95880823	-0,726245657
3	1,5	1,090958196	0,662136596	-0,727546281
4	2	0,99171649	0,472847468	-0,6622438
5	2,5	0,879405735	0,35487811	-0,588031815
6	3	0,778406256	0,279255785	-0,521236066
7	3,5	0,692920103	0,22882853	-0,464701066
8	4	0,621615188	0,193880928	-0,41756328
9	4,5	0,56206397	0,168813385	-0,378218372
10	5	0,511976143	0,150287451	-0,345147664

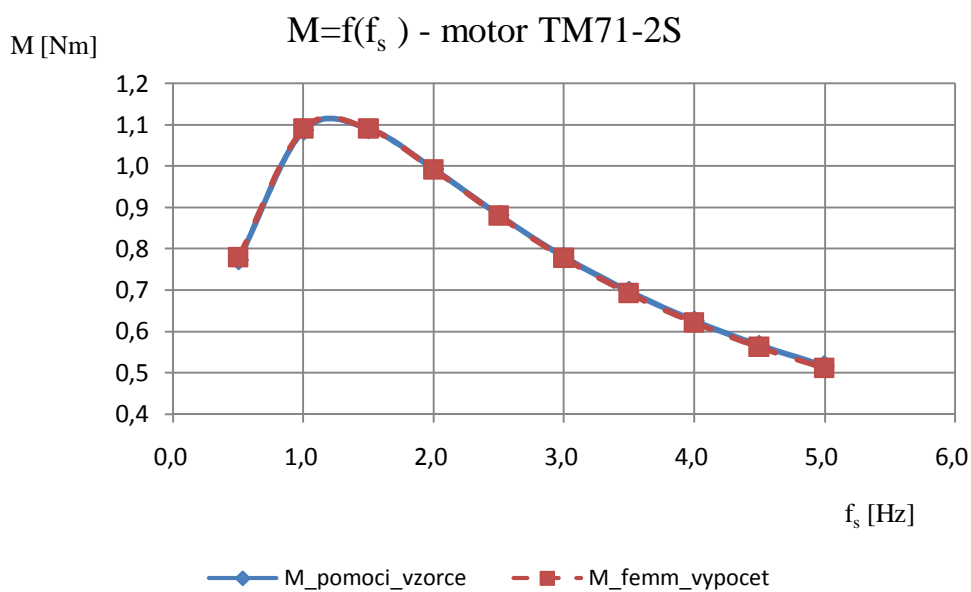
Tab. č. 3: Výsledné vypočítané hodnoty z Lua skriptů - TM71-2S

Srovnání momentu vypočítaného programem FEMM a momentu vypočítaného pomocí vzorce (6.13) je zobrazeno pomocí následujících grafických závislostí.

a) Grafická závislost momentů na skluzové frekvenci - motor TM90-4S



b) Grafická závislost momentů na skluzové frekvenci - motor TM71-2S



Ze zobrazených grafických závislostí a) i b) vyplývá, že vypočítané velikosti momentů pomocí programu FEMM a pomocí vzorce (6.13) si odpovídají.

7 MĚŘENÍ 3F ASYNCHRONNÍCH MOTORŮ

Pro zadané 3f asynchronní motory TM90-4S a TM71-2S[7] byla provedena zkouška naprázdno, nakrátko a dále byla změřena momentová charakteristika $M=f(n)$, případně po přepočtení $M=f(s)$. Zkouška naprázdno se provádí pro velikost skluzu menší než $s=1(-)$.

7.1 Zkouška naprázdno - TM90-4S

Tabulky naměřených (vypočtených) hodnot při zkoušce naprázdno - motor TM90-4S:

č.m.	%Un	α_1	K_1	I_1	α_2	K_2	I_2	α_3	K_3	I_3	α_4	K_4	U_1
	[%]	[d]	[A/d]	[A]	[d]	[A/d]	[A]	[d]	[A/d]	[A]	[d]	[V/d]	[V]
1	110	1,85	$\frac{5}{5}$	1,85	1,9	$\frac{5}{5}$	1,9	1,95	$\frac{5}{5}$	1,95	88	$\frac{600}{120}$	440
2	100	1,35		1,35	1,4		1,4	1,5		1,5	80		400
3	90	1,1		1,1	1,15		1,15	1,2		1,2	72		360
4	80	0,91	$\frac{1}{1}$	0,91	0,99	$\frac{1}{1}$	0,99	0,98	$\frac{1}{1}$	0,98	64	$\frac{240}{120}$	320
5	70	0,76		0,76	0,83		0,83	0,8		0,8	56		280
6	60	0,63		0,63	0,7		0,7	0,66		0,66	48		240
7	50	0,5	$\frac{1}{1}$	0,5	0,56	$\frac{1}{1}$	0,56	0,53	$\frac{1}{1}$	0,53	100	$\frac{240}{120}$	200
8	40	0,4		0,4	0,45		0,45	0,42		0,42	80		160
9	30	0,29		0,29	0,35		0,35	0,32		0,32	60		120
10	20	0,23	$\frac{1}{1}$	0,23	0,26	$\frac{1}{1}$	0,26	0,22	$\frac{1}{1}$	0,22	40		80

Tab. č.4: Naměřené hodnoty při zkoušce naprázdno motoru TM90-4S - 1.část

α_1	K_1	P_1	α_2	K_2	P_2	I_{10}	U_{10}	P_{10}	n	$\cos\varphi_{10}$	ΔP_{Cu10}	ΔP_m	s
[d]	[W/d]	[W]	[d]	[W/d]	[W]	[A]	[V]	[W]	[min ⁻¹]	[-]	[W]	[W]	[%]
55	$\frac{360 \cdot 2}{120}$	-330	84	$\frac{360 \cdot 2}{120}$	504	1,9	440	174	1498	0,120	100,49	9	0,133
39	$\frac{360 \cdot 1}{120}$	-234	59	$\frac{360 \cdot 1}{120}$	354	1,42	400	120	1498	0,122	55,867	9	0,133
49	$\frac{360 \cdot 1}{120}$	-147	81	$\frac{360 \cdot 1}{120}$	243	1,15	360	96	1498	0,134	36,814	9	0,133
55	$\frac{240 \cdot 1}{120}$	-110	91	$\frac{240 \cdot 1}{120}$	182	0,96	320	72	1497	0,135	25,655	9	0,200
76	$\frac{240 \cdot 1}{120}$	-76	65	$\frac{240 \cdot 1}{120}$	130	0,8	280	54	1497	0,140	17,668	9	0,200
51	$\frac{120 \cdot 1}{120}$	-51	94	$\frac{120 \cdot 1}{120}$	94	0,66	240	43	1497	0,156	12,249	9	0,200
30	$\frac{120 \cdot 1}{120}$	-30	61	$\frac{120 \cdot 1}{120}$	61	0,53	200	31	1497	0,169	7,8194	9	0,200
17	$\frac{120 \cdot 1}{120}$	-17	39	$\frac{120 \cdot 1}{120}$	39	0,42	160	22	1496	0,188	4,9887	9	0,267
7	$\frac{120 \cdot 1}{120}$	-7	23	$\frac{120 \cdot 1}{120}$	23	0,32	120	16	1494	0,241	2,8505	9	0,400
0	$\frac{120 \cdot 1}{120}$	0	11	$\frac{120 \cdot 1}{120}$	11	0,24	80	11	1485	0,335	1,5592	9	1,000

Tab. č. 5: Naměřené a vypočtené hodnoty při zkoušce naprázdno motoru TM90-4S - 2.část

7.2 Zkouška naprázdno - TM71-2S

Tabulky naměřených (vypočtených) hodnot při zkoušce naprázdno - motor TM71-2S:

č.m.	%U _n	U	U ₁	I ₁	P ₁	U ₂	I ₂	P ₂	I ₁₀	U ₁₀	P ₁₀	n	cosφ ₁₀	ΔP _{Cu10}
	[%]	[V]	[V]	[A]	[W]	[V]	[A]	[W]	[A]	[V]	[W]	[min ⁻¹]	[-]	[W]
1	110	440	443	0,723	-105	440	0,713	192,4	0,718	441,5	87,1	2989	0,159	43,51
2	100	400	402	0,543	-70,1	400	0,513	131,7	0,528	401	61,6	2989	0,168	23,53
3	90	360	362	0,424	-45,1	359	0,404	93	0,414	360,5	47,9	2989	0,185	14,46
4	80	320	320	0,348	-33,9	319	0,333	72,4	0,341	319,5	38,5	2987	0,204	9,784
5	70	280	281	0,287	-22,9	280	0,286	56,2	0,287	280,5	33,3	2985	0,239	6,927
6	60	240	241	0,24	-12,8	240	0,233	41,1	0,237	240,5	28,3	2982	0,287	4,72
7	50	200	202	0,205	-5,1	199	0,184	29,3	0,195	200,5	24,2	2975	0,358	3,192

Tab. č.6:Naměřené a vypočtené hodnoty při zkoušce naprázdno motoru TM71-2S

7.3 Zkouška nakrátko - TM90-4S

Tabulky naměřených (vypočtených) hodnot při zkoušce nakrátko - motor TM90-4S:

č.m.	I _n	α ₁	K ₁	I ₁	α ₂	K ₂	I ₂	α ₃	K ₃	I ₃	α ₄	K ₄	U ₁
	[A]	[d]	[A/d]	[A]	[d]	[A/d]	[A]	[d]	[A/d]	[A]	[d]	[V/d]	[V]
1	2,5	2,4	$\frac{5}{5}$	2,4	2,44	$\frac{5}{5}$	2,44	2,5	$\frac{5}{5}$	2,5	87	$\frac{120}{120}$	87

Tab. č.7: Naměřené hodnoty při zkoušce nakrátko motoru TM90-4S - 1.část

α ₁	K ₁	P ₁	α ₂	K ₂	P ₂	I _{1k}	U _{1k}	P _{1k}	n	cosφ _{1k}
[d]	[W/d]	[W]	[d]	[W/d]	[W]	[A]	[V]	[W]	[min ⁻¹]	[-]
24	$\frac{120 \cdot 2}{120}$	48	52	$\frac{240 \cdot 2}{120}$	208	2,45	87	256	0	0,6944

Tab. č. 8: Naměřené a vypočtené hodnoty při zkoušce nakrátko motoru TM90-4S - 2.část

ΔP _{Cu1k}	R _k	X _k	R' ₂	Z _{1k}	X _{r1}
[W]	[Ω]	[Ω]	[Ω]	[Ω]	[Ω]
166,64	14,26	14,774	4,976	20,53	7,38688

Tab. č. 9: Vypočtené hodnoty při zkoušce nakrátko motoru TM90-4S - 3.část

7.4 Zkouška nakrátko - TM71-2S

Tabulky naměřených (vypočtených) hodnot při zkoušce nakrátko - motor TM71-2S:

č.m.	I _n	U	U ₁	I ₁	P ₁	U ₂	I ₂	P ₂	I _{1k}	U _{1k}
	[A]	[V]	[V]	[A]	[W]	[V]	[A]	[W]	[A]	[V]
1	1,03	-	127	1,033	45,1	125	1,031	127,2	1,032	126

Tab. č. 10: Naměřené hodnoty při zkoušce nakrátko motoru TM71-2S - 1.část

P_{1k}	n	$\cos\varphi_{1k}$	ΔP_{Cu1k}	R_k	X_k	R'_2	Z_{1k}	X_{r1}
[W]	[min ⁻¹]	[-]	[W]	[Ω]	[Ω]	[Ω]	[Ω]	[Ω]
172	0	0,765	89,88	54	45,4	25,797	70,49	22,698

Tab. č. 11: Vypočtené hodnoty při zkoušce nakrátko motoru TM71-2S - 2.část

8 SROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ

A) TM90-4S

Parametry 3f asynchronního motoru			Způsob identifikace		
Název	Značka	Rozměr	Analyticky	Měření	Simulace
Odpor vinutí statoru	R_1	[Ω]	9,709	9,279	n
Přepočtený odpor vinutí rotoru	R'_2	[Ω]	6,632	4,976	4,33
Rozptylová reaktance fáze statorového vinutí	$X_{1\sigma}$	[Ω]	8,939	7,387	5,899
Rozptylová reaktance fáze rotorového vinutí	$X_{2\sigma}$	[Ω]	10,084	7,387	5,899
Ztráty v železe	ΔP_{Fe}	[W]	47,593	64,339	n
Mechanické ztráty	ΔP_{mech}	[W]	8,408	9	n
Ztráty ve vinutí statoru při chodu naprázdno	ΔP_{j0}	[W]	50,828	46,661	n
Proud naprázdno motoru	I_0	[A]	1,33	1,42	n
Účinník při chodu naprázdno	$\cos\varphi_0$	[-]	0,116	0,133	n

Tab. č. 12: Srovnání výsledků - asynchronní motor TM90-4S

Pozn.: n ... parametr nebyl pomocí této identifikace určen.

B) TM71-2S

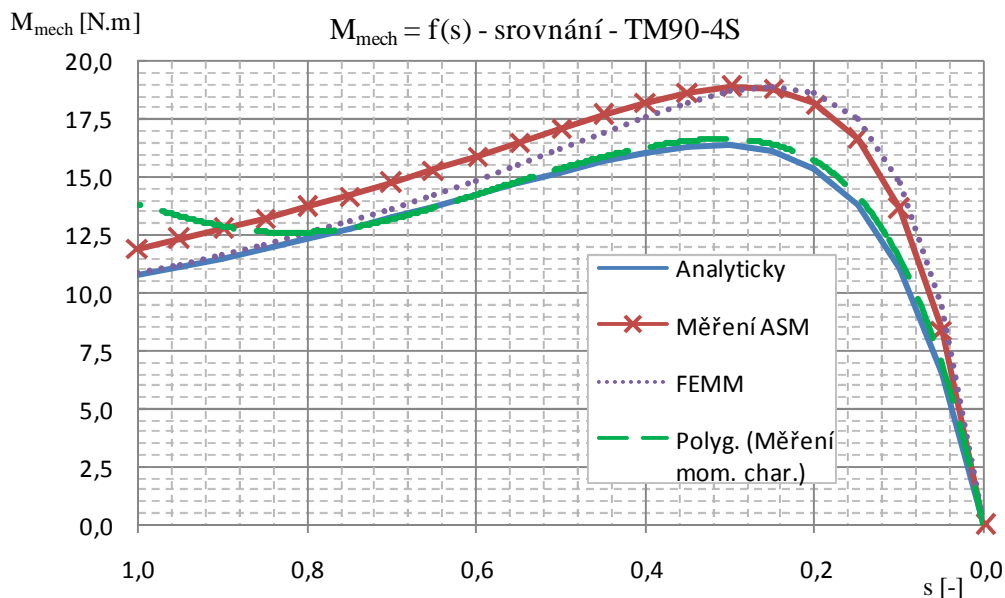
Parametry 3f asynchronního motoru			Způsob identifikace		
Název	Značka	Rozměr	Analyticky	Měření	Simulace
Odpor vinutí statoru	R_1	[Ω]	29,102	28,13	n
Přepočtený odpor vinutí rotoru	R'_2	[Ω]	22,774	25,797	11,481
Rozptylová reaktance fáze statorového vinutí	$X_{1\sigma}$	[Ω]	19,325	22,698	10,237
Rozptylová reaktance fáze rotorového vinutí	$X_{2\sigma}$	[Ω]	21,812	22,698	10,237
Ztráty v železe	ΔP_{Fe}	[W]	22,709	15,07	n
Mechanické ztráty	ΔP_{mech}	[W]	13,454	23	n
Ztráty ve vinutí statoru při chodu naprázdno	ΔP_{j0}	[W]	22,089	23,53	n
Proud naprázdno motoru	I_0	[A]	0,519	0,528	n
Účinník při chodu naprázdno	$\cos\varphi_0$	[-]	0,243	0,367	n

Tab. č. 13: Srovnání výsledků - asynchronní motor TM71-2S

Pozn.: n ... parametr nebyl pomocí této identifikace určen.

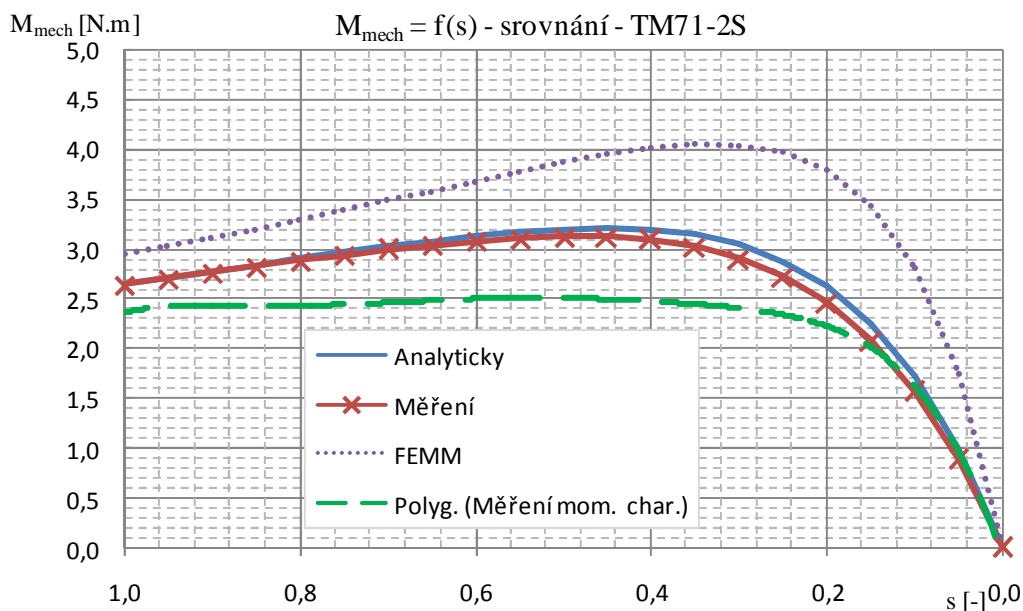
Vynesení grafických závislostí momentu M_{mech} na skluzu s pro motor TM90-4S a TM71-2S:

A) Motor - TM90-4S



Obr. č. 10: Srovnání momentových charakteristik - TM90-4S

B) Motor - TM71-2S



Obr. č. 11: Srovnání momentových charakteristik - TM71-2S

9 ZÁVĚR

Parametry náhradního schématu 3f asynchronního motoru TM90-4S a TM71-2S byly vypočítány numericky, pomocí hodnot získaných z měření tohoto motoru naprázdno a nakrátko a pomocí simulace. První z uvedených motorů je čtyřpólový stroj ($2p=4$) o výkonu $P_2 = 1,1 \text{ kW}$ a druhý dvoupólový stroj ($2p=2$) s výkonem $P_2 = 370 \text{ W}$.

Při řešení pomocí analytického výpočtu byly postupně získávány parametry náhradních schémat výše uvedených motorů. Návrhová metoda byla čerpána z literatury[8]. Pro výpočet a ověření, že dosazované velikosti geometrických rozměrů jsou správné bylo potřeba některé hodnoty získat také podle měření na reálném motoru v laboratoři. Jako materiál, ze kterého bylo vyrobeno jeho statoru a rotoru, byl použit M700-50A[5]. Velikosti jednotlivých parametrů získaných výpočtem jsou uvedeny v tab. č.12 a č.13.

Pro získání parametrů náhradního schématu z měření bylo potřeba provést zkoušku naprázdno a nakrátko. Z výsledných naměřených hodnot byly vypočteny parametry obou motorů TM90-4S a TM71-2S. Zkouška naprázdno byla prováděna do velikosti skluzu, který nepřekročil velikost $s=1 \text{ (\%)}$. Při zkoušce nakrátko byl rotor obou motorů mechanicky zabrzděn a proud protékající statorovým vinutím se nastavil na jmenovitou hodnotu I_n . Velikost odporu statorového vinutí byla změřena za studena i za tepla, případně byla přepočítána na hodnotu 75°C . Výsledné hodnoty parametrů jsou uvedeny ve stejné tabulce jako pro získání jejich hodnot pomocí analytického výpočtu. V rámci měření bylo také provedeno měření momentových charakteristik obou motorů. Při tomto měření se postupovalo tak, že velikost napájecího napětí se snižovala, aby netekl motor velkým proudem. Výsledné hodnoty z měření musely být proto přepočteny. Vliv na získání přesných hodnot parametrů výpočtem z měření naprázdno a nakrátko může mít přesnost měřicích přístrojů, volba měřicí metody a správnost odečtu hodnot z měřicích přístrojů, zaokrouhlování vypočtených hodnot a další možné chyby.

Pomocí simulací v programu FEMM byl proveden výpočet parametrů náhradního schématu výše uvedených asynchronních motorů. K tomuto způsobu získání velikostí prvků ve schématu bylo potřeba vytvořit geometrii ve formátu .dxf obou motorů a nainportovat ji do aplikace FEMM, kde byla provedena série simulací, jejichž výsledky jsou dány do tabulek č.1 a č.2. Tyto získané hodnoty byly zpracovány podle literatury[10].

Celkové srovnání získaných parametrů je uvedeno v tab. č.12 pro motor TM90-4S a v tab. č.13 pro motor TM71-2S. Vypočtená velikost odporu statorového vinutí R_1 se přibližně shoduje s naměřenou a případně přepočtenou (na 75°C) hodnotou v obou tabulkách pro oba motory. Velikosti rozptylových reaktancí získaných pomocí měření a ze simulací jsou brány jako poloviční z celkové získané rozptylové reaktanci. Jejich velikosti jsou také přibližně stejné. Velikosti hodnot získaných parametrů pomocí všech uvedených metod si přibližně odpovídají, kromě provedených simulací, kde se velikost parametrů už výrazně odlišuje, to je poté vidět na charakteristikách zobrazujících srovnání závislosti momentu na skluzu v grafu na obr. č.10 pro motor TM90-4S a v grafu na obr. č.11 pro TM71-2S, vynesenu pomocí hodnot parametrů získaných z jednotlivých metod. Z toho zjištění vyplývá, že velikosti parametrů získaných pomocí simulací nejsou přesné. Velikost nepřesnosti mohla být způsobena způsobem definováním použitých materiálů s ohledem na jejich linearizaci a další nastavení simulace.

LITERATURA

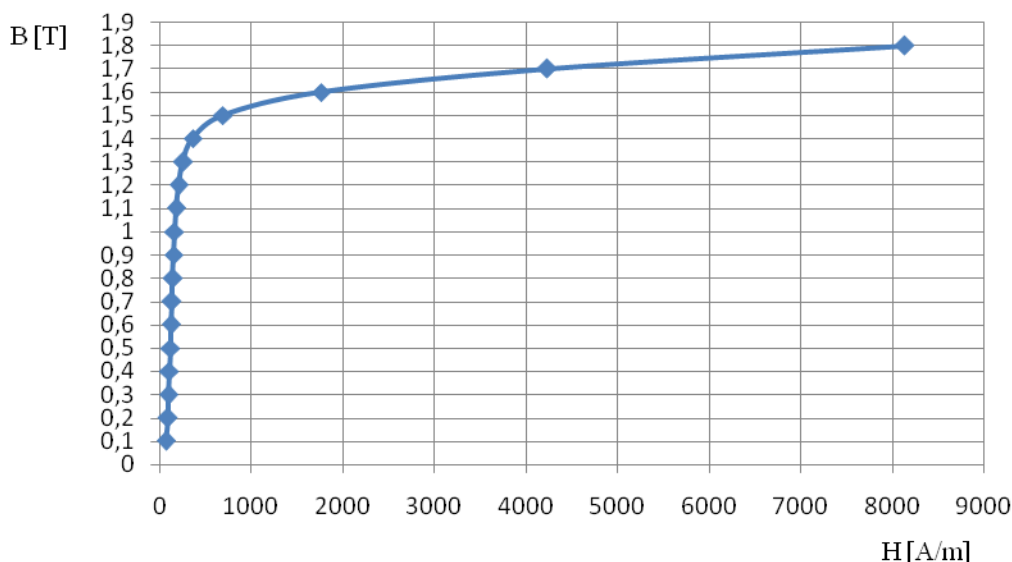
Seznam použité literatury:

- [1] CIGÁNEK, Ladislav. *Elektrické stroje : Působení, provedení a navrhování*. 6. upravené vydání. Praha : Technicko-vědecké vydavatelství, 1951. 816 s.
- [2] CIGÁNEK, Ladislav. *Stavba elektrických strojů*. 1. vydání . Praha : Sntl, 1958. 716 s.
- [3] PETROV, G. N. *Elektrické stroje 2 : Asynchronní stroje - synchronní stroje*. 1. vydání . Praha : Academia, 1982. 732 s.
- [4] ONDRUŠEK, Čestmír. *Skripta : elektricke stroje*, 18.5.2012 [cit. 2012-05-18].
- [5] PDF Dokument. *2011_NOFP_Cogent_plech.pdf*, 18.5.2012 [cit. 2012-05-18].
- [6] ŠTĚPINA, Jaroslav. *Jednofázové indukční motory*. 1. vydání . Praha : Sntl, 1957. 198 s.
- [7] EMP s.r.o. *Slavkov u BRNA* [online]. 2007 [cit. 2012-05-18]. Trojfázové a jednofázové asynchronní motory typu TM a JMC. Dostupné z WWW: <http://www.emp-slavkov.cz/tm_jmc.html> + poskytnuté dokumentace k 3f asynchronnímu motoru TM90-4S a TM71-2S.
- [8] IGOR PETROVIČ KOPYLOV A KOL. *Stavba elektrických strojů*. 1. vydání. Praha: SNTL, 1988. 688 s.
- [9] Metoda konečných prvků. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2012-05-18]. Dostupné z WWW: http://cs.wikipedia.org/wiki/Metoda_kone%C4%8Dn%C3%BDch_prvk%C5%AF
- [10] PEŠEK, M. *Výpočet parametrů asynchronního motoru metodou konečných prvků*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 57 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Ondřej Vítek, Ph.D..
- [11] MEEKER, David. Finite Element Method Magnetics: Download [online].[cit. 2012-05-18]. Program FEMM. Dostupné z WWW: < <http://www.femm.info/Archives/bin/femm42bin.exe>>.

PŘÍLOHY

BH křivka materiálu M700-50A[5]:

Závislost $B=f(H)$ pro materiál M700-50A



Lua skripty určené pro simulaci podle literatury[10]:

a) Motor TM90-4S:

```
-- Simulace 1 - motor TM90-4S

showconsole()                                --zobrazí Lua konzoli
print("ASM: TM90-4S - simulace1")            --výpis textu do okna
open("simulace1_mot_TM90-4S.fem")            --otevření souboru pro simulaci

mi_saveas("simulace1-docasny_soubor.fem")
--uložení v dočasném souboru pro účely vykonávání analýzy

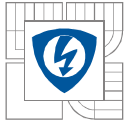
for frekvence = 0.5,5,0.5 do                  --hodnoty od 0.5 do 5 po 0.5Hz
--změna frekvence s krokem 0.5

mi_probdef(frekvence,"millimeters","planar",1e-8,78,30)

mi_analyze()                                  --spuštění analýzy
mi_loadsolution()                             --nahrání řešení
il,ul,tokl=mo_getcircuitproperties("faze_L1")
--the flux linkage pro fazi L1

mo_groupselectblock(1)                       --výběr rotoru
moment=mo_blockintegral(22)                  --výpočet momentu
print("Moment M=",moment,"Nm pro f=",frekvence,"Hz")
--vypsání velikosti momentu a frekvence do Lua konzole

handle=openfile("TM90-4S-vysledky.txt","a");
--zápis hodnot do souboru TM90-4S-vysledky.txt
write(handle,frekvence," ",moment," ",il," ",ul," ",tokl,"\n")
closefile(handle)
```



```
mo_close()  
end
```

b) Motor TM71-2S:

```
-- Simulace 2 - motor TM71-2S  
  
showconsole() --zobrazí Lua konzoli  
print("ASM: TM71-2S - simulace2") --výpis textu do Lua konzole  
open("TM71-2S-simulace2.fem") --otevření souboru pro simulaci  
mi_saveas("simulace2-docasny_soubor.fem")  
--uložení v dočasném souboru pro účely vykonávání analýzy  
  
for frekvence = 0.5,5,0.5 do --hodnoty od 0.5 po 5 po 0.5Hz  
--změna frekvence s krokem 0.5  
  
mi_probdef(frekvence,"millimeters","planar",1e-8,45,30)  
  
mi_analyze() --spuštění analýzy  
mi_loadsolution() --nahrání řešení  
il,u1,tok1=mo_getcircuitproperties("faze_L1")  
--the flux linkage pro fazi L1  
  
mo_groupselectblock(1) --výběr rotoru  
moment=mo_blockintegral(22) --výpočet momentu  
print("Moment M=",moment,"Nm pro f=",frekvence,"Hz")  
--vypsání velikosti momentu a frekvence do Lua konzole  
  
handle=openfile("TM71-2S-vysledky.txt","a");  
--zápis hodnot do souboru TM71-2S-vysledky.txt  
write(handle,frekvence," ",moment," ",il," ",u1," ",tok1,"\n")  
closefile(handle)  
mo_close()  
end
```

Výpočet parametrů motoru TM71-2S podle[8]:

$$2p_1 = 2 \Rightarrow p_1 = 1 [-]$$

$$k_{y1} = \sin\left(\frac{y}{t_p} \cdot \frac{\pi}{2}\right) = \sin\left(1 \cdot \frac{\pi}{2}\right) = 1 [-]$$

$$q_1 = \frac{Q_1}{2p_1 m_1} = \frac{24}{2 \cdot 1 \cdot 3} = 4 [-]$$

$$k_{r1} = \frac{0,5}{q_1 \cdot \sin \frac{30^\circ}{q_1}} = \frac{0,5}{4 \cdot \sin \frac{30^\circ}{4}} = 0,958 [-]$$

$$k_{v1} = k_{y1} k_{r1} = 1 \cdot 0,958 = 0,958 [-]$$

$$k_B = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1,111 [-]$$

$$U_{1N} = \frac{U_N}{\sqrt{3}} = \frac{400}{\sqrt{3}} = 230,94 \text{ V}$$

Dvě dvojčívky (nebo jedna čtyřčívka) po 145 závitů zapojené do série - dokumentace k motoru TM71-2S[7].

$$N_1 = 2 \times 2 \times 145 = 580 (-) \text{ nebo } N_1 = 4 \times 145 = 580 (-)$$

$$\Phi = \frac{k_E U_{1N}}{4k_B N_1 k_{v1} f_1} = \frac{0,975 \cdot 230,94}{4 \cdot 1,111 \cdot 580 \cdot 0,958 \cdot 50} = 1,824 \cdot 10^{-3} \text{ Wb}$$

Činitel k_E byl odečten z grafu v literatuře[8].

$$B_\delta = \frac{p_1 \Phi}{D l_i} = \frac{1 \cdot 1,824 \cdot 10^{-3}}{55 \cdot 10^{-3} \cdot 45 \cdot 10^{-3}} = 0,737 \text{ T}$$

$$t_{d1} = \frac{\pi D}{Q_1} = \frac{\pi \cdot 55 \cdot 10^{-3}}{24} = 7,199 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$D_2 = D - 2\delta = 55 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 0,25 \cdot 10^{-3} = 54,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$t_{d2} = \frac{\pi D_2}{Q_2} = \frac{\pi \cdot 54,5 \cdot 10^{-3}}{17} = 10,072 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$b_{z1av} = \frac{b_{z1min} + b_{z1max}}{2} = \frac{3,318 \cdot 10^{-3} + 3,34 \cdot 10^{-3}}{2} = 3,329 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$B_{z1av} = \frac{B_\delta t_{d1} l_i}{b_{z1av} l_{Fe1} k_{Fe}} = \frac{0,737 \cdot 7,199 \cdot 10^{-3} \cdot 45 \cdot 10^{-3}}{3,329 \cdot 10^{-3} \cdot 45 \cdot 10^{-3} \cdot 0,97} = 1,643 \text{ T}$$

Činitel plnění železa k_{Fe} [-] byl odečten z [8] - zvoleno vrstva oxidu.

$$b_{z2av} = \frac{b_{z2min} + b_{z2max}}{2} = \frac{4,524 \cdot 10^{-3} + 4,736 \cdot 10^{-3}}{2} = 4,63 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$B_{z2av} = \frac{B_\delta t_{d2} l_i}{b_{z2av} l_{Fe2} k_{Fe}} = \frac{0,737 \cdot 10,072 \cdot 10^{-3} \cdot 45 \cdot 10^{-3}}{4,63 \cdot 10^{-3} \cdot 45 \cdot 10^{-3} \cdot 0,97} = 1,653 \text{ T}$$

$$h_{d1} = \frac{D_e - D}{2} - h_{j1} = \frac{106,5 \cdot 10^{-3} - 55 \cdot 10^{-3}}{2} - 13,25 \cdot 10^{-3} = 12,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$h'_{j1} = \frac{D_e - D}{2} - h_{d1} = \frac{106,5 \cdot 10^{-3} - 55 \cdot 10^{-3}}{2} - 12,5 \cdot 10^{-3} = 13,25 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$h_{d2} = h'_0 + h_0 + \frac{b_1}{2} + h_1 + \frac{b_2}{2} [m]$$

Velikost parametru h_{d2} byla odečtena z dokumentace[7]: $h_{d2} = 10,275 \cdot 10^{-3} \text{ m}$

$$h'_{j2} = \frac{2 + p_1}{3,2 p_1} \left(\frac{D_2}{2} - h_{d2} \right) = \frac{2 + 1}{3,2 \cdot 1} \left(\frac{54,5 \cdot 10^{-3}}{2} - 10,275 \cdot 10^{-3} \right) = 15,914 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$B_{j1} = \frac{\Phi}{2 h'_{j1} l_{Fe1} k_{Fe}} = \frac{1,824 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 13,25 \cdot 10^{-3} \cdot 45 \cdot 10^{-3} \cdot 0,97} = 1,577 \text{ T}$$

$$B_{j2} = \frac{\Phi}{2h_{j2}l_{Fe2}k_{Fe}} = \frac{1,824 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 15,914 \cdot 10^{-3} \cdot 45 \cdot 10^{-3} \cdot 0,97} = \underline{1,313 \text{ T}}$$

$$\gamma_1 = \frac{\left(\frac{b_{01}}{\delta}\right)^2}{5 + \left(\frac{b_{01}}{\delta}\right)} = \frac{\left(\frac{2,6 \cdot 10^{-3}}{0,25 \cdot 10^{-3}}\right)^2}{5 + \left(\frac{2,6 \cdot 10^{-3}}{0,25 \cdot 10^{-3}}\right)} = \underline{7,023 [-]}$$

$$\gamma_2 = \frac{\left(\frac{b_{02}}{\delta}\right)^2}{5 + \left(\frac{b_{02}}{\delta}\right)} = \frac{\left(\frac{1,2 \cdot 10^{-3}}{0,25 \cdot 10^{-3}}\right)^2}{5 + \left(\frac{1,2 \cdot 10^{-3}}{0,25 \cdot 10^{-3}}\right)} = \underline{2,351 [-]}$$

$$k_{c1} = \frac{t_{d1}}{t_{d1} - \gamma_1 \delta} = \frac{7,199 \cdot 10^{-3}}{7,199 \cdot 10^{-3} - 7,023 \cdot 0,25 \cdot 10^{-3}} = \underline{1,323 [-]}$$

$$k_{c2} = \frac{t_{d2}}{t_{d2} - \gamma_2 \delta} = \frac{10,072 \cdot 10^{-3}}{10,072 \cdot 10^{-3} - 2,351 \cdot 0,25 \cdot 10^{-3}} = \underline{1,062 [-]}$$

$$k_c = k_{c1} k_{c2} = 1,323 \cdot 1,062 = \underline{1,405 [-]}$$

$$U_\delta = 1,59 \cdot 10^6 B_\delta k_c \delta = 1,59 \cdot 10^6 \cdot 0,737 \cdot 1,405 \cdot 0,25 \cdot 10^{-3} = \underline{411,605 \text{ A}}$$

$$h_{z1} = h_{d1} = \underline{12,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}}$$

$$h_{z2} = h_{d2} - 0,1b_2 = 10,275 \cdot 10^{-3} - 0,1 \cdot 2,1 \cdot 10^{-3} = \underline{10,065 \cdot 10^{-3} \text{ m}}$$

$$U_{z1} = 2h_{z1}H_{z1} = 2 \cdot 12,5 \cdot 10^{-3} \cdot 2650 = \underline{66,25 \text{ A}}$$

Velikost H_{z1} je odečtena z BH křivky materiálu M700-50A[5] pro B_{z1av} .

$$U_{z2} = 2h_{z2}H_{z2} = 2 \cdot 10,065 \cdot 10^{-3} \cdot 2900 = \underline{58,377 \text{ A}}$$

Velikost H_{z2} je odečtena z BH křivky materiálu M700-50A[5] pro B_{z2av} .

$$k_z = 1 + \frac{U_{z1} + U_{z2}}{U_\delta} = 1 + \frac{66,25 + 58,377}{411,605} = \underline{1,303 [-]}$$

Vnitřní průměr rotorového svazku: $D_i = D_h = \underline{18 \cdot 10^{-3} \text{ m}}$

$$h_{j2} = \frac{D_2 - D_i}{2} - h_{d2} = \frac{54,5 \cdot 10^{-3} - 18 \cdot 10^{-3}}{2} - 10,275 \cdot 10^{-3} = \underline{7,975 \cdot 10^{-3} \text{ m}}$$

$$l_{j1} = \frac{\pi(D_e - h_{j1})}{2p_1} = \frac{\pi(106,5 \cdot 10^{-3} - 13,25 \cdot 10^{-3})}{2 \cdot 1} = \underline{146,477 \cdot 10^{-3} \text{ m}}$$

$$l_{j2} = \frac{\pi(D_h + h_{j2})}{2p_1} = \frac{\pi(18 \cdot 10^{-3} + 7,975 \cdot 10^{-3})}{2 \cdot 1} = \underline{40,801 \cdot 10^{-3} \text{ m}}$$

$$U_{j1} = l_{j1}H_{j1} = 146,477 \cdot 10^{-3} \cdot 1415 = \underline{207,265 \text{ A}}$$

Velikost H_{j1} je odečtena z BH křivky materiálu M700-50A[5] pro B_{j1} .

$$U_{j2} = l_{j2} H_{j2} = 40,801 \cdot 10^{-3} \cdot 265 = \underline{10,812 \text{ A}}$$

Velikost H_{j2} je odečtena z BH křivky materiálu M700-50A[5] pro B_{j2} .

$$F_m = U_\delta + U_{z1} + U_{z2} + U_{j1} + U_{j2} \text{ [A]}$$

$$F_m = 411,605 + 66,25 + 58,377 + 207,265 + 10,812 = \underline{754,309 \text{ A}}$$

$$k_\mu = \frac{F_m}{U_\delta} = \frac{754,309}{411,605} = \underline{1,833 [-]}$$

$$I_\mu = \frac{p_1 F_m}{0,9 m_1 N_1 k_{v1}} = \frac{1 \cdot 754,309}{0,9 \cdot 3 \cdot 580 \cdot 0,958} = \underline{0,503 \text{ A}}$$

$$S_1 = \pi \left(\frac{d_1}{2} \right)^2 = \pi \left(\frac{0,425 \cdot 10^{-3}}{2} \right)^2 = \underline{1,419 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2}$$

Vnitřní čtyřcívka:

$$l_{vni_A1} = 2 \cdot (l_{d1_vni} + l_{\epsilon1_vni}) \text{ [m]}$$

$$l_{vni_A1} = 2 \cdot \left(140 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 32,5 \cdot 10^{-3} + \frac{\pi \cdot 2 \cdot 32,5 \cdot 10^{-3}}{2} \right) = \underline{354,204 \cdot 10^{-3} \text{ m}}$$

$$l_{vni_A2} = 2 \cdot (l_{d2_vni} + l_{\epsilon2_vni}) \text{ [m]}$$

$$l_{vni_A2} = 2 \cdot \left(124 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 25 \cdot 10^{-3} + \frac{\pi \cdot 2 \cdot 25 \cdot 10^{-3}}{2} \right) = \underline{305,08 \cdot 10^{-3} \text{ m}}$$

$$l_{vni_celk_4} = 2 \cdot (145 \cdot l_{vni_A1} + 145 \cdot l_{vni_A2}) \text{ [m]}$$

$$l_{vni_celk_4} = 2 \cdot (145 \cdot 354,204 \cdot 10^{-3} + 145 \cdot 305,08 \cdot 10^{-3}) = \underline{191,192 \text{ m}}$$

Vnější čtyřcívka:

$$l_{vne_A1} = 2(l_{d1_vne} + l_{\epsilon1_vne}) \text{ [m]}$$

$$l_{vne_A1} = 2 \cdot \left(145 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 32,5 \cdot 10^{-3} + \frac{\pi \cdot 2 \cdot 32,5 \cdot 10^{-3}}{2} \right) = \underline{364,204 \cdot 10^{-3} \text{ m}}$$

$$l_{vne_A2} = 2(l_{d2_vne} + l_{\epsilon2_vne}) \text{ [m]}$$

$$l_{vne_A2} = 2 \cdot \left(129 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 25 \cdot 10^{-3} + \frac{\pi \cdot 2 \cdot 25 \cdot 10^{-3}}{2} \right) = \underline{315,08 \cdot 10^{-3} \text{ m}}$$

$$l_{vne_celk_4} = 2 \cdot (145 \cdot l_{vne_A1} + 145 \cdot l_{vne_A2}) \text{ [m]}$$

$$l_{vne_celk_4} = 2 \cdot (145 \cdot 364,204 \cdot 10^{-3} + 145 \cdot 315,08 \cdot 10^{-3}) = \underline{196,992 \text{ m}}$$

Odpor vinutí statoru $R_{l_vni_4}$ pro vnitřní čtyřcívku:

$$R_{l_vni_4} = k_{\sim} \rho_{\vartheta} \frac{l_{vni_celk_4}}{S_1 \cdot a} = 1 \cdot \frac{1}{47} \cdot 10^{-6} \cdot \frac{191,192}{1,419 \cdot 10^{-7} \cdot 1} = \underline{28,667 \, \Omega}$$

Odpor vinutí statoru $R_{l_vne_4}$ pro vnější čtyřcívku:

$$R_{l_vne_4} = k_{\sim} \rho_{\vartheta} \frac{l_{vne_celk_4}}{S_1 \cdot a} = 1 \cdot \frac{1}{47} \cdot 10^{-6} \cdot \frac{196,992}{1,419 \cdot 10^{-7} \cdot 1} = \underline{29,537 \, \Omega}$$

Aritmetický průměr odporů statoru:

$$R_{l_arit} = \frac{R_{l_vni_4} + R_{l_vne_4}}{2} = \frac{28,667 + 29,537}{2} = \underline{29,102 \, \Omega}$$

Ve vzorcích je zohledněno zapojení vnitřních a vnějších cívek jedné fáze statoru do série.

$$S_t = 30 \, \text{mm}^2 - \text{odečteno z dokumentace k TM71-2S[7]}$$

$$R_t = \rho_t \frac{l_t}{S_t} k_{\sim} = \frac{1}{21,5} \cdot 10^{-6} \cdot \frac{45 \cdot 10^{-3}}{30 \cdot 10^{-6}} \cdot 1 = \underline{6,977 \cdot 10^{-5} \, \Omega}$$

$$S_{kn} = a_{kn} b_{kn} = 12 \cdot 10^{-3} \cdot 13 \cdot 10^{-3} = \underline{1,56 \cdot 10^{-4} \, \text{m}^2}$$

$$D_{kn} \approx D_2 - a_{kn} = 54,5 \cdot 10^{-3} - 12 \cdot 10^{-3} = \underline{42,5 \cdot 10^{-3} \, \text{m}}$$

$$R_{kn} = \rho_{kn} \frac{\pi D_{kn}}{Q_2 S_{kn}} = \frac{1}{21,5} \cdot 10^{-6} \cdot \frac{\pi \cdot 42,5 \cdot 10^{-3}}{17 \cdot 1,56 \cdot 10^{-4}} = \underline{2,342 \cdot 10^{-6} \, \Omega}$$

$$\Delta = 2 \sin \frac{\pi p_1}{Q_2} = 2 \sin \frac{\pi \cdot 1}{17} = \underline{0,367 [-]}$$

$$R_2 = R_t + \frac{2R_{kn}}{\left(2 \sin \frac{\pi p_1}{Q_2}\right)^2} = 6,977 \cdot 10^{-5} + \frac{2 \cdot 2,342 \cdot 10^{-6}}{\left(2 \sin \frac{\pi \cdot 1}{17}\right)^2} = \underline{1,045 \cdot 10^{-4} \, \Omega}$$

$$p_z = \frac{4m_1 (N_1 k_{v1})^2}{Q_2} = \frac{4 \cdot 3 \cdot (580 \cdot 0,958)^2}{17} = \underline{217931,16 [-]}$$

$$R_2' = R_2 p_z = 1,045 \cdot 10^{-4} \cdot 217931,16 = \underline{22,774 \, \Omega}$$

Zvolena drážka - typ e)[8].

$$\lambda_{d1} = \frac{h_3}{3b} k_{\beta} + \left(0,785 - \frac{b_0}{2b} + \frac{h_2}{b} + \frac{h_0}{b_0}\right) k_{\beta}' [-]$$

$$\lambda_{d1} = \frac{9,193}{3 \cdot 4,502} \cdot 1 + \left(0,785 - \frac{2,6}{2 \cdot 4,502} + \frac{0,5}{4,502} + \frac{0,74}{2,6}\right) \cdot 1 = \underline{1,573 [-]}$$

Nezkrácený krok: $\beta = 1 (-)$

$$l_i' = l_i = \underline{45 \cdot 10^{-3} \, \text{m}}$$

$$l_{\varepsilon} = \frac{\frac{2\pi r_{A1}}{2} + \frac{2\pi r_{A2}}{2}}{2} = \frac{\frac{2\pi \cdot 32,5 \cdot 10^{-3}}{2} + \frac{2\pi \cdot 25 \cdot 10^{-3}}{2}}{2} = \underline{90,321 \cdot 10^{-3} \text{ m}}$$

$$\lambda_{\varepsilon 1} = 0,34 \frac{q_1}{l_i'} (l_{\varepsilon} - 0,64 \beta t_p) = 0,34 \cdot \frac{4}{45 \cdot 10^{-3}} \cdot (90,321 \cdot 10^{-3} - 0,64 \cdot 1 \cdot 86,394 \cdot 10^{-3}) = \underline{1,059 [-]}$$

Při výpočtu se uvažuje aritmetický průměr délek čel cívek l_{ε} [m].

$$\beta_{\gamma} = \frac{b_{\gamma}}{t_{d2}} = \frac{13 \cdot 10^{-3}}{10,072 \cdot 10^{-3}} = \underline{1,291 [-]}$$

$$\xi_1 = 2k_{\gamma}' k_{\beta} - k_{v1}^2 \left(\frac{t_{d2}}{t_{d1}} \right)^2 (1 + \beta_{\gamma}^2) = 2 \cdot 3,1 \cdot 1 - 0,958^2 \left(\frac{10,072 \cdot 10^{-3}}{7,199 \cdot 10^{-3}} \right)^2 (1 + 1,291^2) = \underline{1,409 [-]}$$

Činitel k_{γ}' byl odečten z [8] - $k_{\gamma}' = 3,1 [-]$.

$$\frac{t_{d2}}{t_{d1}} = \frac{10,072 \cdot 10^{-3}}{7,199 \cdot 10^{-3}} = \underline{1,399 [-]}$$

$$\lambda_{dif1} = \frac{t_{d1}}{12\delta k_c} \xi_1 = \frac{7,199 \cdot 10^{-3}}{12 \cdot 0,25 \cdot 10^{-3} \cdot 1,405} \cdot 1,409 = \underline{2,406 [-]}$$

$$X_{1\sigma} = 15,8 \frac{f_1}{100} \left(\frac{N_1}{100} \right)^2 \frac{l_2'}{p_1 q_1} (\lambda_{d1} + \lambda_{\varepsilon 1} + \lambda_{dif1}) [\Omega]$$

$$X_{1\sigma} = 15,8 \frac{50}{100} \left(\frac{580}{100} \right)^2 \frac{45 \cdot 10^{-3}}{1 \cdot 4} \cdot (1,573 + 1,059 + 2,406) = \underline{\underline{15,062 \Omega}}$$

Zvolen byl typ drážky: a) [8].

$$\lambda_{d2} = \left[\frac{h_1}{3b} \left(1 - \frac{\pi b^2}{8S_t} \right)^2 + 0,66 - \frac{b_0}{2b} \right] k_d + \frac{h_0}{b_0} [-]$$

$$\lambda_{d2} = \left[\frac{7,457 \cdot 10^{-3}}{3 \cdot 4,32 \cdot 10^{-3}} \left(1 - \frac{\pi (4,32 \cdot 10^{-3})^2}{8 \cdot 30 \cdot 10^{-6}} \right)^2 + 0,66 - \frac{1,2 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 4,32 \cdot 10^{-3}} \right] \cdot 1 + \frac{0,64 \cdot 10^{-3}}{1,2 \cdot 10^{-3}} = \underline{1,383 [-]}$$

$$\lambda_{\varepsilon 2} = \frac{2,3 D_{kn}}{Q_2 l_i' \Delta^2} \log \frac{4,7 D_{kn}}{2a_{kn} + b_{kn}} = \frac{2,3 \cdot 42,5 \cdot 10^{-3}}{17 \cdot 45 \cdot 10^{-3} \cdot 0,367^2} \log \frac{4,7 \cdot 42,5 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 12 \cdot 10^{-3} + 13 \cdot 10^{-3}} = \underline{0,695 [-]}$$

$$\frac{b_{02}}{\delta} = \frac{1,2 \cdot 10^{-3}}{0,25 \cdot 10^{-3}} = \underline{4,8 [-]}$$

$$\frac{b_{02}}{t_{d2}} = \frac{1,2 \cdot 10^{-3}}{10,072 \cdot 10^{-3}} = \underline{0,119 [-]}$$

$$\xi_2 = 1 + \frac{1}{5} \left(\frac{\pi p_1}{Q_2} \right)^2 - \frac{\Delta_z}{1 - \left(\frac{p_1}{Q_2} \right)^2} = 1 + \frac{1}{5} \left(\frac{\pi \cdot 1}{17} \right)^2 - \frac{0,04}{1 - \left(\frac{1}{17} \right)^2} = \underline{0,967 [-]}$$

Činitel Δ_z byl odečten jako 0,04 (-)[8].

$$\lambda_{dif2} = \frac{t_{d2}}{12\delta k_c} \xi_2 = \frac{10,072 \cdot 10^{-3}}{12 \cdot 0,25 \cdot 10^{-3} \cdot 1,405} \cdot 0,967 = \underline{2,311 [-]}$$

$$X_{2\sigma} = 7,9 f_1 l_i' (\lambda_{d2} + \lambda_{e2} + \lambda_{dif2}) \cdot 10^{-6} = 7,9 \cdot 50 \cdot 45 \cdot 10^{-3} \cdot (1,383 + 0,695 + 2,311) \cdot 10^{-6} = \underline{7,801 \cdot 10^{-5} \Omega}$$

$$X_{2\sigma}' = X_{2\sigma} p_z = 7,801 \cdot 10^{-5} \cdot 217931,16 = \underline{17,001 \Omega}$$

$$\sigma_\gamma \approx 1 + 0,41 \left(\frac{b_\gamma}{t_p} \right)^2 \frac{U_{1N}}{X_{1\sigma} I_\mu} = 1 + 0,41 \left(\frac{13 \cdot 10^{-3}}{86,394 \cdot 10^{-3}} \right)^2 \frac{230,94}{15,062 \cdot 0,503} = \underline{1,283 [-]}$$

$$X_{1\sigma\gamma} = X_{1\sigma} \sigma_\gamma = 15,062 \cdot 1,283 = \underline{19,325 \Omega}$$

$$X_{2\sigma\gamma}' = X_{2\sigma}' \sigma_\gamma = 17,001 \cdot 1,283 = \underline{21,812 \Omega}$$

$$m_{j1} = \pi(D_e - h_{j1}) h_{j1} l_{Fe1} k_{Fe} \gamma_{Fe} [kg]$$

$$m_{j1} = \pi(106,5 \cdot 10^{-3} - 13,25 \cdot 10^{-3}) \cdot 13,25 \cdot 10^{-3} \cdot 45 \cdot 10^{-3} \cdot 0,97 \cdot 7,8 \cdot 10^3 = \underline{1,322 kg}$$

γ_{Fe} ... hustota oceli ($\gamma_{Fe} = 7,8 \cdot 10^3 \text{ kg.m}^{-3}$)

$$m_{z1} \cong h_{z1} b_{z1av} Q_1 l_{Fe1} k_{Fe} \gamma_{Fe} [kg]$$

$$m_{z1} \cong h_{z1} b_{z1av} Q_1 l_{Fe1} k_{Fe} \gamma_{Fe} = 12,5 \cdot 10^{-3} \cdot 3,329 \cdot 10^{-3} \cdot 24 \cdot 45 \cdot 10^{-3} \cdot 0,97 \cdot 7,8 \cdot 10^3 = \underline{0,34 kg}$$

$$m_{z2} = h_{z2} b_{z2av} Q_2 l_{Fe2} k_{Fe} \gamma_{Fe} = 10,065 \cdot 10^{-3} \cdot 4,63 \cdot 10^{-3} \cdot 17 \cdot 45 \cdot 10^{-3} \cdot 0,97 \cdot 7,8 \cdot 10^3 = \underline{0,27 kg}$$

$$\Delta P_{Feh} = \Delta p_{1,0} \left(\frac{f_1}{50} \right)^\beta (k_{dj} B_{j1}^2 m_{j1} + k_{dz} B_{z1av}^2 m_{z1}) [W]$$

$$\Delta P_{Feh} = 2,57 \cdot \left(\frac{50}{50} \right)^\beta (1,6 \cdot 1,577^2 \cdot 1,322 + 1,8 \cdot 1,643^2 \cdot 0,34) = \underline{17,765 W}$$

Měrné ztráty v železe $\Delta p_{1,0}$ jsou $2,57 \text{ W.kg}^{-1}$ pro materiál M700-50A[5].

$$\frac{b_{01}}{\delta} = \frac{2,6 \cdot 10^{-3}}{0,25 \cdot 10^{-3}} = \underline{10,4 [-]}$$

$$\frac{b_{02}}{\delta} = \frac{1,2 \cdot 10^{-3}}{0,25 \cdot 10^{-3}} = \underline{4,8 [-]}$$

Činitelé β_{01} a β_{02} :

$$\beta_{01} = f \left(\frac{b_{02}}{\delta} \right) [-]$$

$\beta_{01} = 0,3 [-]$ - odečteno z grafu[8]

$$\beta_{02} = f \left(\frac{b_{01}}{\delta} \right) [-]$$

$\beta_{02} = 0,41 [-]$ - odečteno z grafu[8]

$$B_{01} = \beta_{01} k_c B_\delta = 0,3 \cdot 1,405 \cdot 0,737 = \underline{0,311 T}$$

$$B_{02} = \beta_{02} k_c B_\delta = 0,41 \cdot 1,405 \cdot 0,737 = \underline{0,425 \text{ T}}$$

$$p_{\delta p1} = 0,5 k_{01} \left(\frac{Q_2 n}{10000} \right)^{1,5} (B_{01} t_{d2} 10^3)^2 [W \cdot m^{-2}]$$

$$p_{\delta p1} = 0,5 \cdot 1,4 \left(\frac{17 \cdot 3000}{10000} \right)^{1,5} (0,311 \cdot 10,072 \cdot 10^{-3} \cdot 10^3)^2 = \underline{79,105 \text{ W} \cdot m^{-2}}$$

$$p_{\delta p2} = 0,5 k_{02} \left(\frac{Q_1 n}{10000} \right)^{1,5} (B_{02} t_{d1} 10^3)^2 [W \cdot m^{-2}]$$

$$p_{\delta p2} = 0,5 \cdot 1,5 \left(\frac{24 \cdot 3000}{10000} \right)^{1,5} (0,425 \cdot 7,199 \cdot 10^{-3} \cdot 10^3)^2 = \underline{135,638 \text{ W} \cdot m^{-2}}$$

$k_{01}, k_{02} \dots$ činitele respektující vliv opracování povrchu hlav zubů statoru a rotoru [-][8]
 $n \dots$ otáčky rotoru [min^{-1}] - zvoleno synchronní - (2-pól: $n_s = 3000 \text{ min}^{-1}$)[8]

Celkové povrchové ztráty ve statoru a rotoru $\Delta P_{\delta p1}$ a $\Delta P_{\delta p2}$:

$$\Delta P_{\delta p1} = p_{\delta p1} (t_{d1} - b_{01}) Q_1 I_{Fe1} = 79,105 \cdot (7,199 \cdot 10^{-3} - 2,6 \cdot 10^{-3}) \cdot 24 \cdot 45 \cdot 10^{-3} = \underline{0,393 \text{ W}}$$

$$\Delta P_{\delta p2} = p_{\delta p2} (t_{d2} - b_{02}) Q_2 I_{Fe2} = 135,638 \cdot (10,072 \cdot 10^{-3} - 1,2 \cdot 10^{-3}) \cdot 17 \cdot 45 \cdot 10^{-3} = \underline{0,921 \text{ W}}$$

Náhradní otevření b'_{01} a b'_{02} se neuvažuje.

Koeficienty pro výpočet Carterova činitele $\gamma'_1 = \gamma_1$ a $\gamma'_2 = \gamma_2$:

$$B_{p1} \approx \frac{\gamma'_2 \delta}{2 t_{d1}} B_{z1av} = \frac{2,351 \cdot 0,25 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 7,199 \cdot 10^{-3}} \cdot 1,643 = \underline{0,067 \text{ T}}$$

$$B_{p2} \approx \frac{\gamma'_1 \delta}{2 t_{d2}} B_{z2av} = \frac{7,023 \cdot 0,25 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 10,072 \cdot 10^{-3}} \cdot 1,653 = \underline{0,144 \text{ T}}$$

$$\Delta P_{p1} \approx 0,11 \left(\frac{Q_2 n}{1000} B_{p1} \right)^2 m_{z1} = 0,11 \left(\frac{17 \cdot 3000}{1000} \cdot 0,067 \right)^2 \cdot 0,34 = \underline{0,437 \text{ W}}$$

$$\Delta P_{p2} \approx 0,11 \left(\frac{Q_1 n}{1000} B_{p2} \right)^2 m_{z2} = 0,11 \left(\frac{24 \cdot 3000}{1000} \cdot 0,144 \right)^2 \cdot 0,27 = \underline{3,193 \text{ W}}$$

$$\Delta P_{Fed} = \Delta P_{\delta p1} + \Delta P_{\delta p2} + \Delta P_{p1} + \Delta P_{p2} = 0,393 + 0,921 + 0,437 + 3,193 = \underline{4,944 \text{ W}}$$

$$\Delta P_{Fe} = \Delta P_{Feh} + \Delta P_{Fed} = 17,765 + 4,944 = \underline{22,709 \text{ W}}$$

$$K_T = 1,3(1 - D_e) = 1,3(1 - 106,5 \cdot 10^{-3}) = \underline{1,162 [-]}$$

$$\Delta P_{mech} = K_T \left(\frac{n}{10} \right)^2 D_e^4 = 1,162 \left(\frac{3000}{10} \right)^2 (106,5 \cdot 10^{-3})^4 = \underline{13,454 \text{ W}}$$

$$\Delta P_{j0} \approx m_1 R_1 I_\mu^2 = 3 \cdot 29,102 \cdot 0,503^2 = \underline{22,089 \text{ W}}$$

$$I_{0j} \approx I_\mu = \underline{0,503 \text{ A}}$$

$$I_{0\varepsilon} = \frac{\Delta P_{Fe} + \Delta P_{mech} + \Delta P_{j0}}{m_1 U_{1N}} = \frac{22,709 + 13,454 + 22,089}{3 \cdot 230,94} = \underline{0,126 \text{ A}}$$

$$I_{0\varepsilon} = I_{Fe} = \underline{0,126 \text{ A}}$$

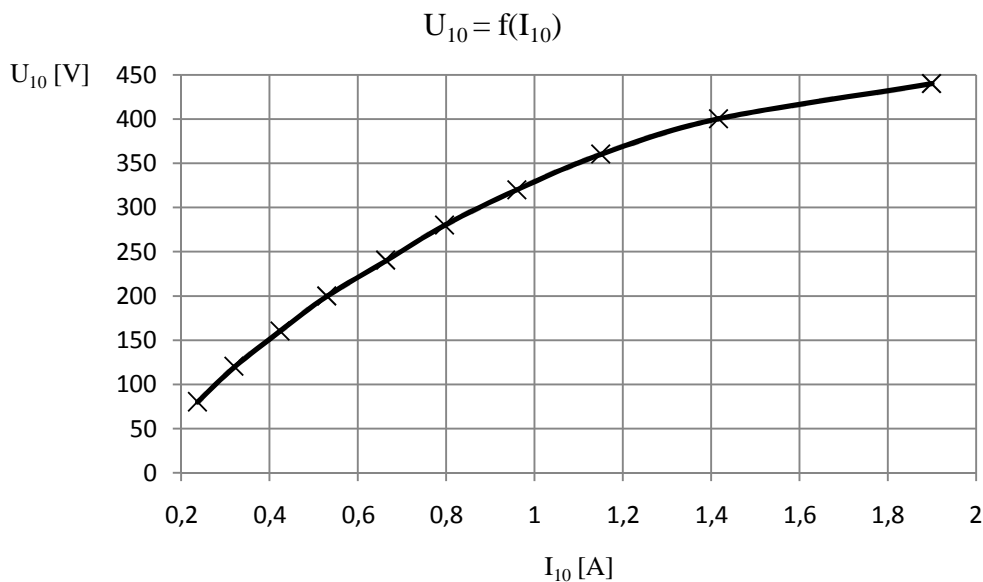
$$I_0 = \sqrt{I_{0\varepsilon}^2 + I_{0j}^2} = \sqrt{0,126^2 + 0,503^2} = \underline{0,519 \text{ A}}$$

$$\cos \varphi_0 = \frac{I_{0\varepsilon}}{I_0} = \frac{0,126}{0,519} = \underline{0,243 [-]}$$

Grafické závislosti z měření naprázdno a nakrátko motoru TM90-4S a TM71-2S:

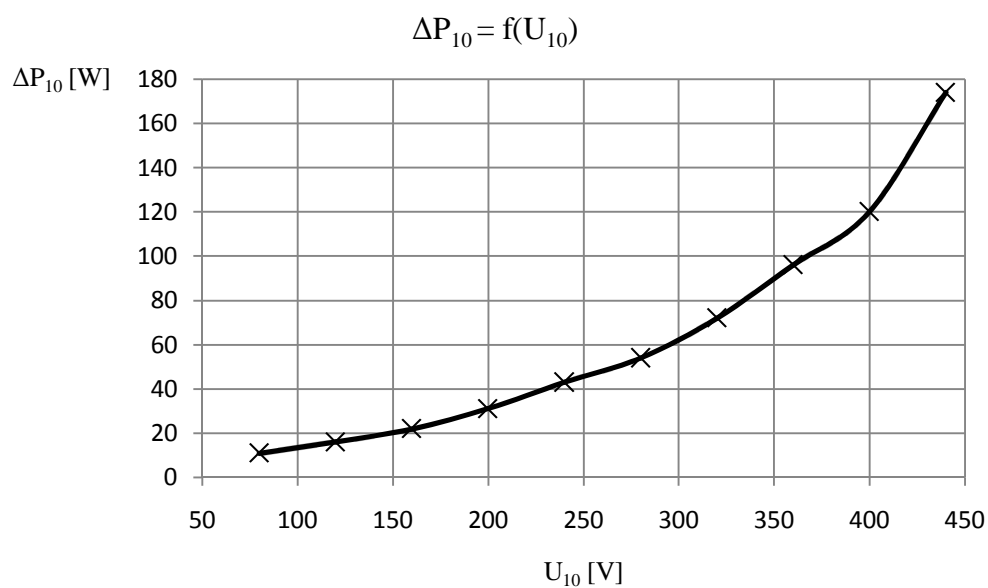
1) Motor TM90-4S:

a) Grafická závislost $U_{10}=f(I_{10})$



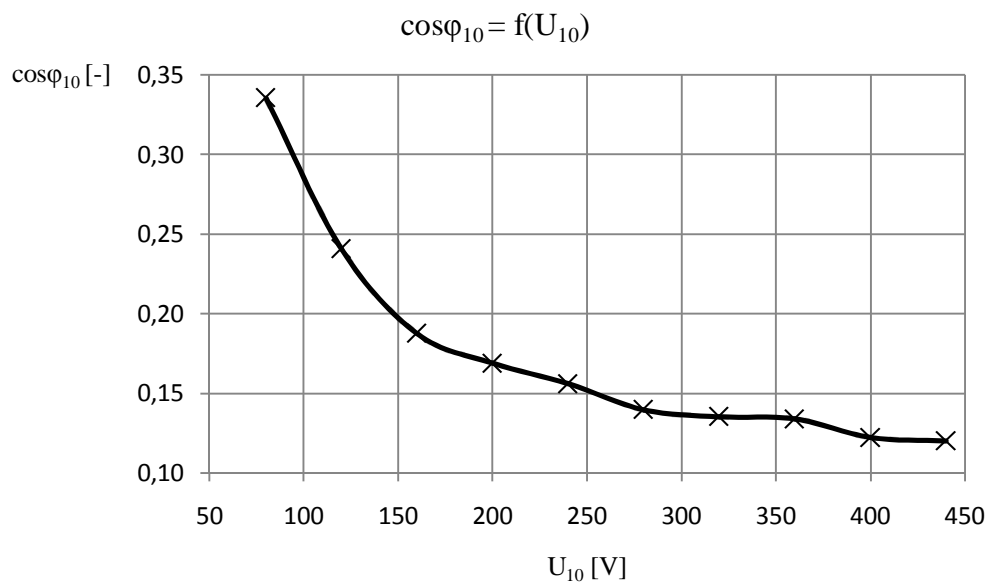
Obr. č. 12: Měření naprázdno - TM90-4S - graf a)

b) Grafická závislost $\Delta P_{10}=f(U_{10})$



Obr. č. 13: Měření naprázdno - TM90-4S - graf b)

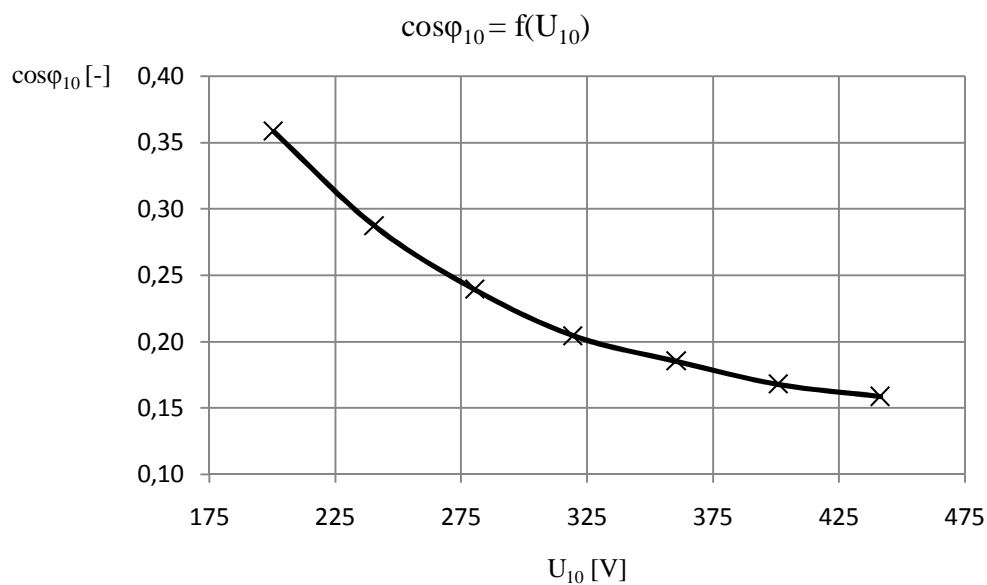
c) Grafická závislost $\cos\varphi_{10}=f(U_{10})$



Obr. č. 14: Měření naprázdno - TM90-4S - graf c)

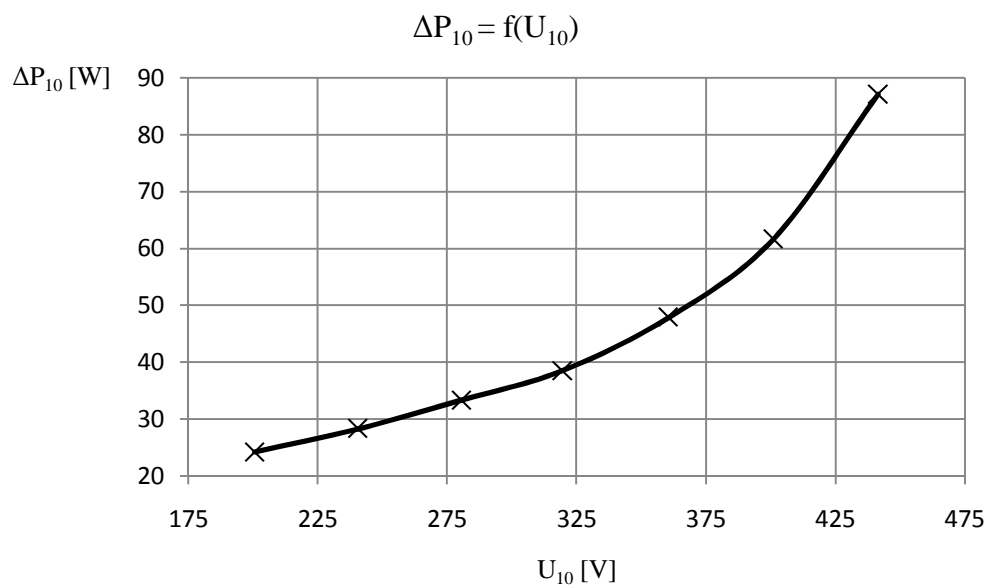
2) Motor TM71-2S:

a) Grafická závislost $\cos\varphi_{10}=f(U_{10})$



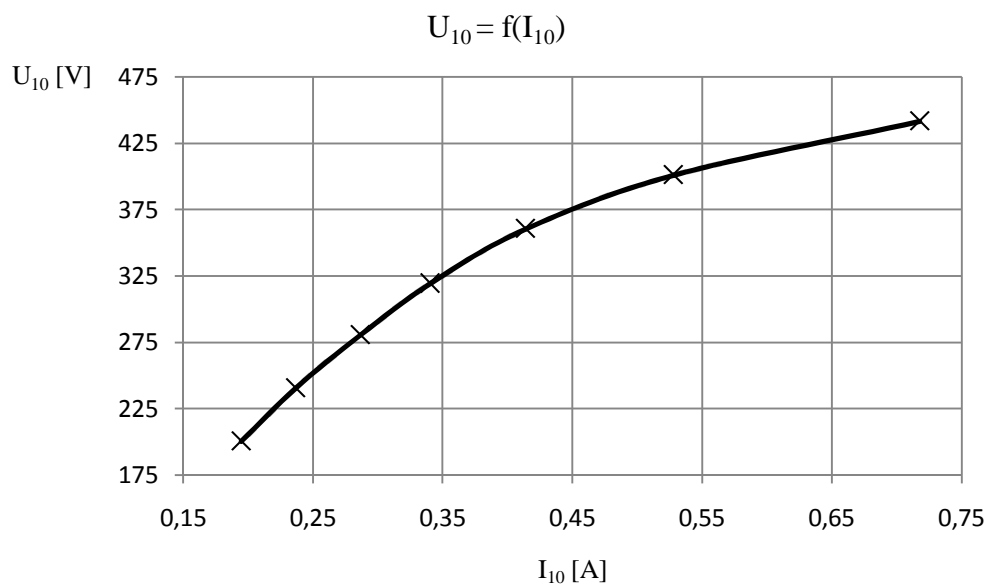
Obr. č. 15: Měření naprázdno - TM71-2S - graf d)

b) Grafická závislost $\Delta P_{10}=f(U_{10})$



Obr. č. 16: Měření naprázdno - TM71-2S - graf e)

c) Grafická závislost $U_{I_0}=f(I_{I_0})$



Obr. č. 17: Měření naprázdno - TM71-2S - graf f)